

Критерии экономической эффективности использования исследовательских реакторов, предназначенных для материаловедческих испытаний

ЦЫКАНОВ В. А., ЗАЛЕТНЫХ Б. А., КИРИЛЛОВ Е. В., КУПРИЕНКО В. А.

При разработке нового или реконструкции и эксплуатации действующего исследовательского реактора неизбежно возникают проблемы сравнительной оценки возможных технических решений. Такие оценки требуют применения тех или других критериев сравнения. Выбор критерия может оказать существенное или даже решающее влияние на окончательное решение.

В работах [1, 2] рассмотрены возможные физические критерии, по которым можно сравнить исследовательские реакторы или различные режимы эксплуатации одного реактора, а также оптимизировать некоторые его характеристики. Поскольку в эти критерии входят только физические и эксплуатационные параметры реакторов, они позволяют проводить количественные сравнения в физических единицах, например по производительности, определенной как суммарное число полезно используемых нейтронов в единицу времени:

$$P = \sum_{i=1}^n \Phi_i \Sigma_i V_i, \quad (1)$$

где Φ_i , V_i , Σ_i — соответственно плотность нейтронного потока, нейтр./(см²·с); эффективный экспериментальный объем, см³; макроскопическое нейтронное сечение образцов для i -го экспериментального канала, см⁻¹; n — число экспериментальных каналов в реакторе.

Однако эти критерии не позволяют провести количественные экономические оценки, более полно характеризующие целесообразность выбора того или иного варианта при сооружении нового исследовательского реактора, а также определить эффективность режимов эксплуатации или реконструкции действующих реакторов. В настоящей работе в качестве критерия количественной экономической оценки эффективности возможных технических решений предлагается использовать получаемый экономический эффект.

В общем виде в соответствии с методикой определения экономической эффективности новой техники [3] более рациональным является вариант, обеспечивающий наименьшие приведенные затраты по сравнению с другими возможными (существующими) вариантами:

$$Z = c + E_n K, \quad (2)$$

где Z — приведенные затраты на единицу продукции (работы), руб./ед.; c — себестоимость единицы продукции (работы), руб./ед.; E_n — нормативный коэффициент эффективности одновременных затрат, 1/год; K — единовременные затраты (капиталовложения, затраты на разработку и т. д.), отнесенные к годовому объему производства продукции (работы), руб./ед.

Годовой экономический эффект от применения новой техники определяется по формуле

$$\Delta = (Z_1 - Z_2) A_2, \quad (3)$$

где Z_1 , Z_2 — приведенные затраты на единицу продукции (работы) по базовой и новой технике соответственно; A_2 — годовой объем производства продукции (работы) с помощью новой техники, ед./год.

Следует иметь в виду, что наряду с экономическим эффектом (или вместо него) новое техническое решение может давать и научно-технический, и социальный эффект и т. п., что должно учитываться при выборе варианта новой техники. В настоящей работе для исследовательских реакторов рассматривается вопрос об определении только экономического эффекта. При этом эффективность использования реактора оценивается не с позиции эффективности результатов проводимых на нем НИОКР (что заставило бы рассматривать ценность и целесообразность работ, их народнохозяйственное значение и т. п.), а с позиций его использования как инструмента исследований.

Показатель приведенных затрат для исследовательских реакторов

Рассмотрим основные понятия, входящие в формулы (2) и (3), применительно к исследовательским реакторам.

Единовременные затраты. В зависимости от рассматриваемой задачи единовременные затраты могут включать затраты на разработку проекта нового реактора и соответствующие НИОКР в обоснование этого проекта, капиталовложения в сооружение нового реактора, затраты на разработку проекта реконструкции действующего реактора и соответствующие НИОКР в обоснование этого проекта, капиталовложения в реконструкцию действующего реактора или, наконец, затраты

на реализацию этого или иного варианта эксплуатации действующего реактора. В методическом плане определение единовременных затрат для исследовательских реакторов не представляет трудностей.

Годовой объем выпуска и себестоимость единицы продукции (работы). Применительно к новой технике, используемой в народном хозяйстве для выпуска конкретной продукции, определение этих понятий чаще всего также не вызывает затруднений. Как правило, производимая продукция измеряется в определенных натуральных показателях, а ее себестоимость — соответствующим отношением расходов на объем производства. Исследовательские реакторы используются не для выпуска какой-либо продукции, а для выполнения широкого круга научно-исследовательских работ. Поэтому вопросы об определении объема работы, выполняемой на исследовательском реакторе, о конкретных единицах измерения этого объема являются не простыми.

Следует отметить, что проблема измерения объема работы, выполняемой на экспериментальных и опытных установках (исследовательские реакторы относятся к этой категории установок), освещена, на наш взгляд, в литературе недостаточно. Наиболее распространена точка зрения, что максимальный объем работы, который возможно выполнить на экспериментальной или опытной установке (ее пропускная способность) определяется полезным фондом времени работы в течение конкретного календарного отрезка времени [4]. Аналогичным образом определяется пропускная способность опытного производства в работе [5].

Такой подход, вероятно, является весьма условным и в лучшем случае справедлив к установкам, работающим по единственно возможному технологическому циклу с обеспечением строго определенного результата своей работы. Если же установка может обеспечить хотя и единственный результат, но по нескольким технологическим циклам, то за одно и то же время эффективность ее работы может быть различной. Тем более такой подход несправедлив, если установка используется для нескольких целей или производит различную продукцию, причем соотношение между объемами выпуска продукции может зависеть от режима эксплуатации опытной (экспериментальной) установки.

При определении производительности или результатов работы подобных опытных и экспериментальных установок, наряду с показателем их использования во времени, необходимо привлекать натуральные показатели. Исследовательские реакторы относятся к таким опытным установкам. В них, как правило, проводятся одновременно различные экспериментальные работы, значение которых обычно нельзя оценить одним показателем. Для выполнения этих работ в разных экспериментальных устройствах реактора создаются неодинаковые условия, и, кроме того, эти условия

(а значит, качество и время достижения намеченного результата) существенно зависят от режима работы. Более того, различия в назначении исследовательских реакторов также влияют на выбор характерных натуральных показателей для оценки эффективности их работы. Поэтому они будут разные для реакторов универсального назначения (например, СМ-2) или для петлевых реакторов, предназначенных для испытаний опытных ТВС (например, МИР) [6]. Особенности петлевых исследовательских реакторов подробно рассмотрены в работе [7].

Критерий экономической эффективности

Изложенные соображения о выборе показателей объема работы и себестоимости единицы продукции (работы) исследовательских реакторов учитываются при определении критерия для оценки их экономической эффективности.

Универсальные исследовательские реакторы.

В экспериментальных каналах универсальных исследовательских реакторов облучают образцы различных материалов и топливные композиции, исследуют их свойства в процессе облучения, а также проводят другие эксперименты, требующие взаимодействия нейтронов с образцами облучаемого вещества. При этом обычно необходимо поддерживать максимальное значение плотности нейтронного потока в каналах реактора, поскольку при таких условиях на каждый эксперимент потребуются наименьшее время. Для этой цели мощность универсального исследовательского реактора целесообразно всегда поддерживать максимальной. Если по условиям какого-либо эксперимента не требуется максимальной плотности потока нейтронов или нужна температура, обеспечение которой возможно лишь при пониженной мощности реактора, то такой эксперимент, как правило, проводится в экспериментальных устройствах, позволяющих поддерживать необходимые параметры без снижения мощности реактора, т. е. не в ущерб всем другим экспериментам [6]. Таким образом, в универсальном исследовательском реакторе натуральным показателем, на основе которого может быть получен необходимый критерий, является суммарное число полезно используемых в единицу времени нейтронов, определенное выражением (1). Поскольку этот показатель зависит и от свойств облучаемых образцов (через Σ_i), то удобнее рассматривать для каждого канала произведение $\Phi_i V_i$, которое характеризует лишь возможности реактора, не зависящие от свойств облучаемых образцов. С учетом сказанного показатель годового объема работы универсального исследовательского реактора (нейтр.·см/год) может быть записан в виде

$$A = 31,54 \cdot 10^6 K_p K_m \sum_{i=1}^n \Phi_i V_i K_{эк_i}, \quad (4)$$

где $31,54 \cdot 10^6$ — число секунд в календарном году, с/год; K_p — коэффициент использования реактора по времени, определенный как отношение времени работы реактора на мощности к календарному времени, отн. ед.; K_m — коэффициент использования установленной мощности реактора, определенный как отношение энерговыработки реактора за время его работы к энерговыработке, которая имела бы место, если бы реактор все это время работал на номинальной мощности, отн. ед.; $K_{экi}$ — коэффициент использования i -го экспериментального канала, определенный как отношение времени полезной работы i -го канала ко времени работы реактора, отн. ед.

Если коэффициент $K_{экi}$ принять равным единице, а K_p и K_m — теоретически максимально возможными для данного реактора, формула (4) будет показывать максимальный годовой объем работы, который возможно выполнить на реакторе (или его годовую пропускную способность). Если эти коэффициенты принять равными плановым или фактическим значениям, по формуле (4) будут определены соответственно плановый и фактический объем работы реактора.

Годовые затраты на работу реактора (для простоты рассматриваем случай без регенерации отработавшего топлива) в соответствии с работой [8] определяются по формуле

$$C = C_0 = \frac{8760 K_p K_m N g c_T}{\alpha}, \quad (5)$$

где C_0 — годовые затраты на эксплуатацию реактора (без учета затрат на ядерное топливо), руб./год; 8760 — число часов в году, ч/год; N — номинальная мощность реактора, МВт; g — расход ядерного топлива на выработку единицы тепловой энергии, кг ^{235}U /МВт·ч; c_T — стоимость ядерного топлива в ТВС, включая затраты на их изготовление, руб./кг ^{235}U ; α — среднее выгорание выгружаемого ядерного топлива, определенное как отношение выгоревшего ^{235}U к первоначальному его количеству, отн. ед.

Разделив выражение (5) на (4), определим себестоимость единицы работы, выполняемой на исследовательском реакторе, и, добавив к ней $E_n K$, получим выражение для приведенных затрат:

$$Z = c + E_n K = \frac{C}{A} + E_n K = \frac{1}{3600 \sum_{i=1}^n \Phi_i V_i K_{экi}} \times \left(\frac{C_0}{8760 K_p K_m} + \frac{N g c_T}{\alpha} \right) + E_n K, \text{ руб./нейтр.см.} \quad (6)$$

Петлевые реакторы. Петлевые исследовательские реакторы, предназначены для испытаний опытных ТВС. Испытания проводятся в экспериментальных каналах, подключенных к специальным охлаждающим контурам, которые называются петлями.

При испытаниях опытных ТВС в петлях необходимо имитировать условия работы штатных ТВС в будущих реакторах. Поэтому режим работы петлевого реактора должен обеспечивать заданные режимы испытаний сборок во всех одновременно работающих петлевых каналах. Первоначальное согласование необходимых условий испытаний в каждом канале достигается специальными регулирующими устройствами, позволяющими установить различные режимы при определенной (далеко не всегда максимальной) мощности реактора. В ходе испытаний происходит изменение режимов и их рассогласование. Чтобы поддерживать их в заданных пределах, используются оперативные органы регулирования, а также в ряде случаев корректируется (обычно увеличивается) мощность реактора. Процесс установления и поддержания режима работы петлевого реактора считается тем более совершенным, если заданные режимы испытаний в петлевых каналах достигаются при меньшей его мощности и незначительно отклоняются во время работы реактора. Таким образом, режим работы петлевого реактора и характеристики экспериментальных каналов являются переменными величинами и зависят от характера испытаний. Следовательно, для петлевого реактора, в отличие от универсального, в качестве общего случая нельзя выбрать натуральным показателем производительности число полезно используемых в единицу времени нейтронов.

Поэтому в работе [7] производительность петлевого реактора предлагается измерять так:

$$P = \sum_{i=1}^n (K_{эк} K_{реж})_i = n \bar{K}_{эк} \bar{K}_{реж}, \quad (7)$$

где $K_{режi}$ — коэффициент соблюдения заданного режима испытаний для i -го канала; $K_{реж}$ — усреднение по числу каналов, когда производительность реактора определяется для некоторого отрезка времени. Наличие этого коэффициента обусловлено тем, что время испытания ТВС в любом петлевом канале с отклонением от заданных режимов не может зачитываться в общее время проведения испытаний. Этот коэффициент определяется как отношение времени работы канала в заданных режимах к общему времени занятости канала данным экспериментом.

Таким образом, для петлевого реактора производительность измеряется числом экспериментов, проводимых в заданных режимах в течение рассматриваемого отрезка времени. В таком случае годовой объем работы, выполняемой на петлевом реакторе, можно записать в виде

$$A = 8760 K_p \sum_{i=1}^n (K_{эк} K_{реж})_i = 8760 K_p \bar{K}_{эк} \bar{K}_{реж} \quad n, \text{ ч/год.} \quad (8)$$

С учетом специфики использования петлевого реактора (переменная мощность в зависимости от режима испытаний) годовые расходы на его эксплуатацию целесообразно представить в виде

$$C = C_0 + W g c_T / \alpha, \text{ руб./год}, \quad (9)$$

где W — энерговыработка реактора, МВт·ч/год. Разделив выражение (9) на (8), находим себестоимость единицы работы на петлевом реакторе. Прибавив к ней $E_n K$, получим критерий экономической эффективности петлевого реактора в виде приведенных затрат:

$$Z = c + E_n K = \frac{C}{A} + E_n K = \frac{(W g c_T / \alpha) + C_0}{8760 K_p \sum_{i=1}^n (K_{ЭК} K_{РЕК})_i} + E_n K, \text{ руб./ч.} \quad (10)$$

При использовании в качестве показателя объема работы величины, вычисляемой по формуле (8), нельзя определить максимальный объем работы, который можно выполнить на петлевом реакторе, что требуется, например, при сравнении проектируемых или действующих реакторов одинакового назначения, но разной конструкции. Для этого случая максимальный годовой объем работы, который может быть выполнен на петлевом реакторе, предлагается определять следующим образом:

$$A = 8760 K_p \sum_{i=1}^n (q_{\max} V K_{ЭК} K_{РЕК})_i, \text{ кВт·ч/год}, \quad (11)$$

где $q_{\max i}$ — удельное энерговыделение в i -м канале, достигаемое при работе реактора на максимальной мощности, кВт/см³.

В выражении (11) в качестве натурального показателя производительности петлевого реактора, в отличие от универсального, где производительность измеряется суммарной величиной полезно используемых нейтронов в единицу времени, выбрана суммарная максимальная мощность всех экспериментальных каналов. Поэтому объем

работы в выражении (11) измеряется полезно используемой суммарной энерговыработкой петлевых каналов (кВт·ч). Это соответствует целевому назначению петлевых реакторов — испытанию опытных ТВС, один из основных показателей которых — глубина выгорания — для энергетических реакторов чаще всего определяется удельной энерговыработкой ТВС (например, МВт·сут/т U).

Полученные критерии для универсальных и петлевых исследовательских реакторов легко подсчитываются, так как в них входят величины, характеризующие свойства конкретных реакторов, а также без труда определяемые в процессе эксплуатации. В большинстве случаев все они определяются предварительно как плановые значения. Поэтому с помощью критериев можно не только оценить экономическую эффективность того или иного технического решения (например, при сооружении нового или реконструкции действующего реактора), но и определить экономические выигрыш или потери при отклонении режимов эксплуатации реактора от запланированного режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цыканов В. А.** «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 1, с. 45.
2. **Цыканов В. А.** «Атомная энергия», 1972, т. 33, вып. 4, с. 849.
3. **Методика** (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. М., «Экономика», 1977.
4. **Торф Э. М.** Экономика и организация опытных производств. М., «Экономика», 1975.
5. **Башин М. Л.** Планирование работ отраслевых НИИ и КБ. М., «Экономика», 1973.
6. **Цыканов В. А., Самсонов Б. В.** Техника облучения материалов в реакторах с высоким нейтронным потоком. М., Атомиздат, 1973.
7. **Цыканов В. А., Куприенко В. А.** Препринт НИИАР П-26 (320). Димитровград, 1977.
8. **Цыканов В. А.** «Атомная энергия», 1963, т. 14, вып. 5, с. 469.

Поступила в Редакцию 07.05.79

УДК 621.039.534.44

Физические основы нейтрально-кислородного водного режима

АНАНЬЕВ Е. П., КРУЖИЛИН Г. Н.

Несомненно, совершенно справедливо говорится, что наилучшей теоретической основой является правильно поставленный эксперимент. Причем это, быть может, в наиболее полной мере относится к комплексным процессам технологического характера, когда одновременно происходят явления, относимые к различным разделам науки. Тем не менее и здесь нужна в «чистой» теории как обобщении накопленных знаний всегда остается в связи с тем, что практически необхо-

димо интерполировать имеющиеся опытные данные, т. е. обосновать уверенность в отсутствии непредвиденно резких изменений искомой величины в исследованном интервале параметров. Именно в связи с этим последним обстоятельством излагаются те представления, какие сложились в процессе внедрения в практику нейтрально-кислородного водного режима (НКВР).

Прежде всего следует отметить, что школа акад. А. Н. Фрумкина дала обширную теорию