

Ж 53  
А99

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

# Атомная Энергия

Ежемесячный журнал  
ГОД ИЗДАНИЯ ТРИНАДЦАТЫЙ

АТОМИЗДАТ ■ МОСКВА ■ 1968

Том 24 ■ Апрель ■ Вып. 4

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН, Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора), А. К. КРАСИН, А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор), П. Н. ПАЛЕЙ, Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМИРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО

### СОДЕРЖАНИЕ

#### СТАТЬИ

- А. К. Красин, И. И. Саламатов, В. Б. Нестеренко, А. Н. Девойно. Развитие исследований в Институте ядерной энергетики АН БССР . . . . . 307
- С. Т. Конобецкий, Б. М. Левитский, Л. Д. Пантелеев. К вопросу о механизме радиационного роста урана при малых дозах облучения . . . . . 312
- В. И. Векслер, В. П. Саранцев, А. Г. Бонч-Осмоловский, Г. В. Долбильов, Г. А. Иванов, И. П. Иванов, М. Л. Иовнович, И. В. Кожухов, А. Б. Кузнецов, В. Г. Маханьков, Э. А. Перельштейн, В. П. Рашевский, К. А. Решетникова, Н. Б. Рубин, С. Б. Рубин, П. И. Рыльцев, О. И. Ярковой. Коллективное линейное ускорение ионов . . . . . 317
- В. П. Дзюбенко, В. П. Дмитриевский, Б. И. Замолотчиков, В. В. Кольга. Кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой для многозарядных ионов 323
- В. В. Арсенин, В. А. Чуянов. О возможности подавления дрейфовой неустойчивости неоднородной плазмы с помощью системы обратных связей . . 327
- В. М. Вондаренко, Г. Г. Викторов, А. Г. Тархов. Об использовании космического излучения для оценки эффективности биологических защит . . . . . 330
- С. Н. Барков. Многогрупповой аналитический метод расчета гетерогенного ядерного реактора . . . 335
- П. Т. Потапенко. Предельная оценка качества внутриреакторного контроля нейтронного потока . . . 340
- Д. М. Каминер, К. А. Коноплев, Ю. П. Семенов, В. Д. Тренин. Поведение продуктов радиолиза при работе реактора ВВР-М без системы дегазации 343
- В. А. Жарков, В. П. Терентьев, Г. М. Фрадкин. Получение топлива изотопных электрогенераторов методами нейтронного облучения . . . . . 348
- Ю. В. Рябов, Со Дон Сик, Н. Чиков, Н. Янева. Измерение отношения сечений радиационного захвата и деления для  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  в резонансной области энергий нейтронов . . . . . 351

- В. А. Афанасьев, Б. В. Кебадзе, Г. А. Санковский, В. И. Грицков, И. Н. Соколов, Л. А. Адамовский, С. А. Маркин. Экспериментальное исследование устойчивости корпусного кипящего реактора ВК-50 363

#### АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

- Д. П. Осанов, В. П. Панова, Г. Б. Радзиевский. Измерение дозовых факторов накопления для точечных изотропных источников  $\gamma$ -излучения низкой энергии в воде 368
- В. А. Жарков, Т. П. Зорина, Г. М. Фрадкин. Самоэкранирование тепловых нейтронов в конечных цилиндрах и телах других геометрий . . . . . 369
- И. Н. Бриккер, В. П. Астафьев, А. Р. Мирзаин. Обращенное решение тепловых уравнений двухкомпонентного ядерного реактора . . . . . 370
- С. Ф. Дегтярев, А. П. Суворов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Пространственные, угловые и энергетические распределения быстрых нейтронов в гидриде лития, воде, вольфраме и карбиде бора 370
- С. Ф. Дегтярев, В. Б. Староверов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Экспоненциальные угловые коэффициенты нейтронов для неводородосодержащих сред 372
- В. К. Даруга, С. Ф. Дегтярев, В. И. Кухтевич, А. Н. Николаев, В. П. Поливанский, Б. И. Синицын, А. П. Суворов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Пространственно-энергетические и угловые распределения нейтронов в литии . . . . . 372
- С. М. Рубанов, В. И. Титов, Л. С. Шкорбатова. Расчет защиты контура с циркулирующим горючим . . 373
- В. Д. Горяченко. Акустическая неустойчивость ядерного реактора . . . . . 374
- В. Д. Горяченко, Е. Ф. Сабаев. Акустические колебания в реакторе с циркулирующим газообразным горючим . . . . . 375
- В. Д. Горяченко, В. А. Денеев, Ю. Ф. Трунин. Влияние изменения плотности делящегося вещества на устойчивость реактора с циркулирующим веществом 376
- В. С. Шуленни. Применение асимптотического  $P_N$ -приближения для расчета ячейки . . . . . 376

285607

225307/м



РГ

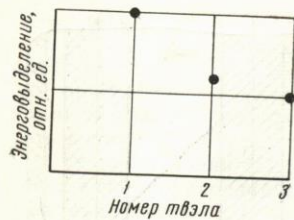


Рис. 3. Энергосвечение в ТВЭЛ 1, 2, 3.

а  $\beta_{11}^{(1)}$  — нейтроны, возникающие в результате деления ядер горючего от влетающего в блок нейтрона. На рис. 3 точками показано энергосвечение в ТВЭЛ, попавших в рассматриваемое сечение активной зоны. Время для расчета одного значения определителя в данном примере составляло  $\sim 40$  сек. Число ТВЭЛ при отсутствии периодичности в их расположении и число групп, для которого можно проводить расчет по данной методике, определяются максимальным порядком определителя, который можно вычислить на ЭВМ. Если среди ТВЭЛ

можно выделить  $P$  периодических групп, то порядок определителя уменьшается в  $P$  раз.

В заключение автор выражает благодарность Е. С. Глушкову за участие в постановке задачи и ценные советы в процессе ее решения и В. А. Ходакову за обсуждение математических аспектов задачи.

Поступила в Редакцию 24/V 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Фейнберг. В сб. «Реакторостроение и теория реакторов». М., Изд-во АН СССР, 1955, стр. 152.
2. А. Д. Галанин. Там же, стр. 191.
3. В. И. Носов. «Атомная энергия», 9, 262 (1960).
4. T. Auegbach, G. Burgaud, H. Soosak. Доклад № 690, представленный Швейцарией на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
5. С. Б. Шихов, В. И. Давыдов, Л. К. Шихов. В сб. «Инженерно-физические вопросы ядерных реакторов». М., Атомиздат, 1966, стр. 67.
6. Н. Н. Лебедев. Специальные функции и их приложения. М., Физматгиз, 1963.

Предельная оценка качества внутриреакторного контроля нейтронного потока

П. Т. ПОТАПЕНКО

УДК 621.039.564.2

Как правило, мощность реактора ограничивается максимально допустимой температурой реакторных материалов. Температура горючего и замедлителя связана с нейтронным потоком соотношением [1]

$$t = t_0 + \frac{a}{gC_p} \int_0^z \Phi(r) dz + b\Phi(r), \quad (1)$$

где  $t_0$  — температура теплоносителя на входе;  $\Phi(r)$  — нейтронный поток в точке  $r$ ;  $g$  и  $C_p$  — соответственно расход и теплоемкость теплоносителя;  $a$ ,  $b$  — теплофизические параметры, постоянные для конкретного реактора;  $z$  — координата вдоль оси канала, отсчитанная от входа теплоносителя в реактор.

Из уравнения (1) следует важный вывод: для того чтобы в любой точке активной зоны температура материала не превышала, например, более чем на 10% свое номинальное значение, достаточно, чтобы система контроля не допускала превышения нейтронного потока во всех точках активной зоны, а также температуры теплоносителя на входе в реактор более чем на 10% от номинального уровня. При этом считается, что расход теплоносителя всегда выше не-

которого зонального предела. Таким образом, система контроля нейтронного потока обеспечивает контроль лимитирующих температур. Оперативный контроль нейтронного потока осуществляется обычно проще, нежели температурный контроль.

Единственным источником возмущения коэффициента размножения  $k_{\infty}$  являются регулирующие элементы. Это предположение несущественно ограничивает полученные результаты, так как в районе возможного нахождения максимума потока отклонение коэффициента размножения от номинального значения за счет эффектов реактивности на порядок меньше максимальных возмущений, вносимых регулируемыми элементами, ввиду малости допустимых отклонений потока. Кроме того, примем, что регулирующие элементы могут быть введены равномерно в любой район активной зоны.

Определим понятие качества контроля как минимально возможное отношение максимума потока, отмеченного датчиками, к истинному значению максимума потока. Качество  $Q = 1$  означает, что датчик не имеет приборной погрешности и помещен в точку с максимальным

потоком. Важность определения этой величины диктуется тем, что предельно допустимая мощность пропорциональна качеству контроля.

Пусть контроль осуществляется прямоугольной решеткой датчиков, ячейкой которой является параллелепипед с восемью датчиками на вершинах и сторонами  $l, m, n$ . Докажем следующее положение: наиболее сильным возмущением для системы контроля является полное удаление регулирующих элементов из ячейки контроля и такая компенсация этого возмущения вне ячейки, что максимум потока устанавливается в центре ее. Такое возмущение назовем предельным.

На рисунке представлен возмущенный поток в одномерном реакторе (плоская бесконечная пластина) между двумя датчиками  $D_1$  и  $D_2$ . Из диффузионного уравнения

$$\frac{d^2\Phi}{dz^2} = \frac{1-k_\infty}{M^2} \Phi \quad (2)$$

следует, что при  $k_\infty > 1$  распределение потока описывается выпуклой кривой (см. на рисунке *a, б*), при  $k_\infty < 1$  кривая распределения вогнута (см. на рисунке *г*), при  $k_\infty = 1$  распределение потока описывается прямой линией (см. на рисунке *в*). При этом, чем больше модуль  $|k_\infty - 1|$ , тем больше при том же потоке и его производной кривизна распределения:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\left| \frac{d^2\Phi}{dz^2} \right|}{\left[ 1 + \left( \frac{d\Phi}{dz} \right)^2 \right]^{3/2}} = \frac{|1-k_\infty| \Phi}{M^2 \left[ 1 + \left( \frac{d\Phi}{dz} \right)^2 \right]^{3/2}}, \quad (3)$$

где  $\rho$  — радиус кривизны распределения;  $M^2$  — площадь миграции нейтронов.

Пусть теперь из центральной области  $AB$  между датчиками удалены регулирующие элементы (и, следовательно, коэффициент размножения  $k_\infty$  достиг максимального значения), а реактор скомпенсирован до критического состояния вне области  $AB$ . В этом случае за пределами области  $AB$  кривые распределения будут различными в зависимости от  $k_\infty$ , но все они гладко «сшиваются» в точке  $B$ . Согласно приведенным рассуждениям, наименьшее качество контроля будет при распространении области  $AB$  на всю ячейку контроля  $D_1D_2$ , так как при любом уменьшении  $k_\infty$ , согласно формуле (3), кривая распределения отклоняется вверх от кривой, соответствующей максимальному коэффициенту размножения.

Справедливость этого подтверждается тем, что при постоянном  $k_\infty$  вид кривой распределения при изменении граничных условий не

меняется; сдвигается лишь ее максимум (изменяется фаза синусоиды). Ясно, что наименее точно максимум определяется датчиками  $D_1$  и  $D_2$  при его расположении в середине между ними, т. е. при симметричных граничных условиях.

Аналогичные рассуждения справедливы и для трехмерного реактора.

Рассчитаем качество контроля для предельного возмущения. Пусть парциальные доли утечек, зависящие от граничных условий на противоположных гранях ячейки контроля, по осям  $x, y, z$  соответственно равны  $U_x, U_y, U_z$ . Тогда утечки и соответствующие им параметры  $B$  составляют:

по оси  $x$

$$\Delta k_x = U_x(k_\infty - 1), \quad B_x^2 = \frac{U_x(k_\infty - 1)}{M^2}; \quad (4)$$

по оси  $y$

$$\Delta k_y = U_y(k_\infty - 1), \quad B_y^2 = \frac{U_y(k_\infty - 1)}{M^2}; \quad (5)$$

по оси  $z$

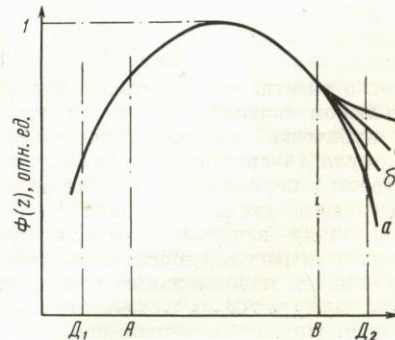
$$\Delta k_z = U_z(k_\infty - 1), \quad B_z^2 = \frac{U_z(k_\infty - 1)}{M^2}, \quad (6)$$

причем

$$U_x + U_y + U_z = 1. \quad (7)$$

Располагая начало координат в центре ячейки контроля и учитывая симметричность граничных условий на противоположных гранях, найдем поток, измеряемый датчиком:

$$\Phi_D = \cos \frac{n \sqrt{U_x(k_\infty - 1)}}{2M} \cos \frac{m \sqrt{U_y(k_\infty - 1)}}{2M} \times \cos \frac{l \sqrt{U_z(k_\infty - 1)}}{2M}. \quad (8)$$



Возмущенный поток в ячейке контроля одномерного реактора:  
 $a - k_\infty > 1$ ;  $б - 1 < k_\infty < k_\infty$ ;  $в - k_\infty = 1$ ;  
 $г - k_\infty < 1$ .

Разлагая каждый из сомножителей в формуле (8) в ряд и отбрасывая члены выше второй степени, получаем приближенное соотношение

$$\Phi_d = 1 - \frac{k_\infty - 1}{8M^2} (U_x n^2 + U_y m^2 + U_z l^2). \quad (9)$$

Формула (9) обеспечивает удовлетворительную точность (~1%) до значения  $\Phi_d = 0,8$ .

Нас интересует минимально возможное значение выражения (9), которое по определению и ввиду нормировки максимума потока на 1 является качеством контроля  $\Phi_d \equiv Q_0$ . Учитывая (7), перепишем выражение (9) в следующем виде:

$$\Phi_d = 1 - \frac{k_\infty - 1}{8M^2} [U_x n^2 + U_y m^2 + (1 - U_x - U_y) l^2]. \quad (10)$$

Для определенности положим  $l > m$  и  $l > n$  и найдем частные производные:

$$\frac{\partial \Phi_d}{\partial U_x} = \frac{k_\infty - 1}{8M^2} (l^2 - n^2) > 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Phi_d}{\partial U_y} = \frac{k_\infty - 1}{8M^2} (l^2 - m^2) > 0. \quad (12)$$

Так как функция  $\Phi_d(U_x, U_y)$  не имеет экстремумов, то наименьшее ее значение, согласно выражениям (11) и (12), будет достигнуто при условии

$$U_x = U_y = 0, \quad (13)$$

т. е. при идеальном выравнивании потока по осям  $x$  и  $y$ . Подставляя (13) в (10), находим качество контроля

$$Q_0 = 1 - \frac{k_\infty - 1}{8M^2} l^2. \quad (14)$$

Формула (14) дает заниженное значение качества, т. е. с запасом. Однако ее погрешность не более

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{6} \cdot \frac{(1 - Q_0)^2}{Q_0} \cdot 100\%. \quad (15)$$

Легко видеть, что формула (14) справедлива при любом соотношении сторон ячейки. Так, для кубической решетки датчиков  $m = n = l$ , и формула (14) сразу следует из (9), т. е. качество контроля в первом приближении не зависит от соотношения утечек на гранях куба.

Поскольку качество контроля при любом размещении регулирующих элементов целиком определяется максимальным размером ячейки, то минимуму датчиков соответствует кубическая решетка. При ограниченной свободе перемещения регулирующих элементов, а также для неоднородного реактора решение задачи на минимум числа датчиков даст расположение датчиков, отличное от кубической решетки.

До сих пор мы считали, что датчики измеряют поток без погрешности. Очевидно, что приборная погрешность  $\varepsilon$  снижает качество контроля до величины

$$Q = Q_0 (1 - \varepsilon). \quad (16)$$

Связь качества с приборной погрешностью и физическими параметрами реактора может быть достаточно точно выражена формулой

$$Q = 1 - \varepsilon - \frac{k_\infty - 1}{8M^2} l^2. \quad (17)$$

В формулах (14) и (17) физические параметры  $k_\infty$  и  $M$  берутся при номинальном уровне мощности и соответствующем ему отравлении реактора и при удаленных регулирующих элементах.

Применим полученные результаты для нахождения числа датчиков по заданному качеству  $Q_0$ . Для этого из формулы (14) определим линейный размер кубической решетки:

$$l = 2M \sqrt{\frac{2(1 - Q_0)}{k_\infty - 1}}. \quad (18)$$

При любом расположении регулирующих элементов максимум потока не может находиться ближе к эффективным границам реактора, чем на расстоянии [2]

$$h = \frac{\pi M}{2 \sqrt{k_\infty - 1}}. \quad (19)$$

Тогда для больших реакторов датчики необходимо разместить равномерно в объеме реактора, кроме внешнего слоя  $h$ , в количестве

$$N = \frac{\pi (2R \sqrt{k_\infty - 1} - \pi M)^2 (2H \sqrt{k_\infty - 1} - \pi M)}{64M^3 \sqrt{2(1 - Q_0)^3}}, \quad (20)$$

где  $R$  и  $H$  — соответственно эффективные радиус и высота реактора.

Если регулирующие элементы вводятся в реактор всегда на полную высоту, подобно системе управления «гидравлический шар» [3], то в этом случае необходимо разместить датчики равномерно в плоскости (делящей реактор пополам по высоте), кроме кольцевой области толщиной

$$h' = \frac{\pi M}{2 \sqrt{k_\infty - \Delta k_T - 1}}, \quad (21)$$

в количестве

$$N = \frac{\pi (2R \sqrt{k_\infty - \Delta k_T - 1} - \pi M)^2}{32M^2 (1 - Q_0)}. \quad (22)$$

Здесь  $\Delta k_T = \frac{\pi^2 M^2}{H^2}$  — торцовая утечка нейтронов.

При выходе из строя одного датчика предельным возмущением будет такое, когда максимум потока устанавливается у неисправного датчика. Ближайшие исправные датчики в этом случае образуют октаэдр с линейным размером  $l\sqrt{2}$ , и качество контроля в этом районе уменьшается до величины

$$Q_0 = 1 - \frac{k_\infty - 1}{6M^2} l^2. \quad (23)$$

Формула (23) получается при рассмотрении предельного возмущения, созданного внутри сферы, описывающей октаэдр. В этом случае для безопасной работы реактора должна быть снижена мощность, по крайней мере в районе шести датчиков, прилегающих к неисправному, или снижен предел срабатывания аварийной защиты по этим датчикам на величину ухудшения качества.

Пользуясь понятием предельного возмущения, можно рассчитать качество контроля и для

случая, когда регулирующие элементы вводятся локально, например в виде стержней.

Предложенная методика позволяет дать предельную оценку эффективности систем объемного контроля нейтронного потока в активной зоне реактора.

В заключение автор выражает признательность Е. В. Филипчуку и В. И. Наумову за обсуждение работы.

Поступила в Редакцию 3/VI 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Пономарев - Степной. «Инж.-физ. ж.», № 2, 42 (1962).
2. А. Я. Крамеров, Я. В. Шевелев. Инженерные расчеты ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
3. Hydraulic Ball (Hy-Ball) Control System Development Program, 1-5 Quarterly Progress Reports, USAEC Report GNEC-251. General Nuclear Engineering Corporation, 1962, 1963.

## Поведение продуктов радиолита при работе реактора ВВР-М без системы дегазации

Д. М. КАМИНГЕР, К. А. КОНОПЛЕВ, Ю. П. СЕМЕНОВ, В. Д. ТРЕНИН

УДК 621.039.568

В водяном замедлителе-теплоносителе реакторов под действием излучения образуются водород и его перекись. Радиационно-химические выходы этих молекулярных продуктов, а также некоторых других, являющихся результатом взаимодействия радикалов и молекулярных продуктов с примесями, растворенными в воде, зависят от многих факторов. К их числу относятся мощность поглощенной дозы, соотношение разных видов излучения, присутствие в воде растворенных газов и примесей, температура воды, скорость прохождения воды через активную зону и т. п.

На количество растворенных в воде продуктов радиолита и их соотношение существенное влияние оказывает тип и конструкция реактора. Например, в реакторах бассейнового типа и в кипящих реакторах газообразные продукты радиолита удаляются из воды, что влияет на установление равновесных концентраций продуктов радиолита.

Следует отметить, что в литературе имеются многочисленные данные по исследованию механизма радиолита и влиянию перечисленных выше факторов на радиолит воды. Однако изу-

чению радиолита воды непосредственно на действующих реакторах с водой, используемой в качестве замедлителя и теплоносителя, посвящено сравнительно мало работ [1-4, 6].

Радиолит воды, охлаждающей активную зону реакторов, имеет специфические особенности, которые часто невозможно воспроизвести в лабораторных условиях.

Указанные соображения явились причиной того, что в технологическую схему охлаждения реакторов ВВР-С, ВВР-М и им подобных с целью обеспечения максимальной безопасности их эксплуатации были введены довольно сложные системы дегазации, предназначенные для удаления образующегося при радиолите воды водорода [5] (рис. 1).

Изучение эффективности работы системы дегазации и сжигания гремучей смеси на реакторе ВВР-М поставило под сомнение целесообразность ее использования [6]. После проведения экспериментов, показавших, что концентрация водорода в воде первого контура охлаждения реактора при мощности до 18 Мвт не зависит от того, работает или не работает система дегазации, а ее величина гораздо меньше вели-