

УДК 621.039.5

# История становления и практической реализации концепции связанных реакторов

**В. Ф. Колесов**

*Прослежена история становления и практической реализации концепции связанных реакторных устройств, нашедших яркое воплощение в области аperiodических импульсных реакторов. Показано, что использование концепции связанных реакторных устройств существенно расширяет возможности проводимых на реакторах экспериментов.*

## *Введение*

Реактор можно называть связанным, если его активная зона (АЗ) состоит из двух частей, отличающихся составом, формой, геометрическими размерами или разделенных пространственно, а некоторая доля делений, хотя бы в одной части АЗ, вызывается нейтронами от делений в другой части. К связанным реакторам относят также реакторы, состоящие из трех и более частей. Устройства указанного типа иначе называют двухсекционными или многосекционными реакторами.

Основными характеристиками ансамбля связанных реакторов являются:

- коэффициент размножения нейтронов  $k_{jj}$  (с учетом или без учета запаздывающих нейтронов) и среднее время жизни мгновенных нейтронов  $\tau_{jj}$  в  $j$ -м реакторе при отсутствии другого реактора;

- коэффициент связи двух реакторов  $k_{jk}$ , который можно определить как коэффициент размножения нейтронов в  $j$ -м реакторе, относящийся к нейтронам  $k$ -го реактора;

- $\tau_{jk}$  – среднее время жизни мгновенного нейтрона, родившегося в реакторе  $k$  и вызвавшего деление в реакторе  $j$ .

Связанные реакторы являются объектом многих теоретических и экспериментальных исследований, выполненных и выполняемых в разных странах, в том числе и в России. основополагающей теоретической работой по связанным реакторам, определившей и терминологию в этой области, является доклад Р. Эйвери, сотрудника Аргоннской национальной лаборатории (США), опубликованный в 1958 г. в материалах Второй Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии [1].

## Стационарные связанные реакторы

В историческом плане стационарные связанные реакторы рассматривались в основном в связи с проблемой обеспечения безопасности энергетических реакторов с расширенным воспроизводством топлива. Исследовались реакторы, в которых деления в АЗ генерировались только быстрыми, а в отражателе-blankете, являвшемся зоной воспроизводства, – и быстрыми, и тепловыми нейтронами. Связанная система обычно действует таким образом, что некоторая доля делений, происходящих в одном реакторе, вызывается нейтронами, родившимися в другом. В этом случае каждый реактор в отдельности подкритичен, а связанная система, состоящая из быстрого и теплового реакторов, в любых разумных ситуациях не становится критической на одних быстрых нейтронах. Быстро-тепловые связанные реакторы сочетают в себе высокий коэффициент воспроизводства топлива, свойственный быстрым реакторам, с большим временем жизни нейтронов, характерным для тепловых реакторов. Такие реакторы отличаются большей, чем обычные быстрые реакторы, безопасностью в отношении реактивностью инициированных аварий (РИА).

Одни из первых развернутых экспериментов по связанным реакторам проводились в Аргоннской национальной лаборатории США [2, 3]. Основная цель первых опытов заключалась в экспериментальном подтверждении общих положений теории связанных реакторов и в составлении заключения о применении таких устройств в качестве энергетических реакторов-размножителей.

Быстрая секция в системе [2] занимала внутреннюю область объемом 50 л, окруженную слоем внутренней зоны воспроизводства толщиной 13,7 см из природного урана и алюминия. Далее располагались слой бериллия толщиной 28 см и внешняя зона воспроизводства из обедненного урана. Сверху и снизу эта цилиндрическая конфигурация окружалась обедненным ураном. Экспериментальная критическая загрузка в АЗ на быстрых нейтронах составила 137 кг  $^{235}\text{U}$ .

Измерения характеристик системы сопровождалась разносторонними их расчетами на основе многогрупповых нейтронных констант и теории связанных реакторов. Результат сравнения показателей исследованной связанной быстро-тепловой системы с ее прототипом – реактором на быстрых нейтронах – приведен в табл. 1.

Таблица 1

Параметры связанной быстро-тепловой системы и обычного реактора на быстрых нейтронах [2]

Параметр	Связанная система	Реактор на быстрых нейтронах
Критическая загрузка $^{235}\text{U}$ , кг	137	155
Время жизни нейтронов, с	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Коэффициент размножения без учета делений на тепловых нейтронах	0,96	1
Доля мощности, обусловленная делениями на тепловых нейтронах	0,12	0
Коэффициент неравномерности радиального распределения энерговыделения	1,1	1,3
Коэффициент воспроизводства	1,20	1,38

На основе анализа экспериментальных и расчетных данных, полученных для рассмотренной связанной системы, были сделаны следующие выводы:

1) связанная система может быть сконструирована так, что ее коэффициент воспроизводства будет очень близок к коэффициенту воспроизводства реактора на быстрых нейтронах, а время

жизни мгновенных нейтронов будет немногим меньше, чем у обычного теплового реактора, и примерно в сто раз больше, чем в реакторе на быстрых нейтронах. Связанная система будет иметь запас до критичности на быстрых нейтронах ~4 %;

2) наблюдается согласие между теорией и экспериментом, указывающее на то, что никаких неизвестных и неожиданных явлений в подобных системах не возникает, к этим системам применимы обычные многогрупповые методы расчета;

3) различные экспериментальные методы, использованные при изучении связанной системы, вполне удовлетворительны, причем некоторые из них дают непосредственные сведения о параметрах связанных реакторов.

Экспериментальное изучение связанной системы быстрого и теплового реакторов проводилось также на модифицированном варианте установки ZPR-V [3], который состоял из центральной АЗ без замедлителя, отделенной от внешней кольцевой зоны с водяным замедлителем зоной воспроизводства из природного урана (рис. 1). Зона воспроизводства предотвращала всплеск интенсивности делений на границе внутренней АЗ, вызываемый нейтронами низких энергий из тепловой внешней АЗ. Быстрая АЗ помещалась в железном баке со стенками толщиной 12,7 мм.

Топливо в виде пластин из  $^{235}\text{U}$  и природного урана толщиной 1,93 мм было заключено в железные кассеты размером  $7,62 \times 7,62 \times 60,96$  см. Каждая пластина содержала 376 г  $^{235}\text{U}$  и 1177 г  $^{238}\text{U}$ . Для получения более низкого среднего обогащения топлива в быструю АЗ добавлялись также пластины из природного урана.

Большинство экспериментов выполнялось при отношении  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  в быстрой АЗ, равном 5. В этом случае в объеме быстрой АЗ содержалось примерно 35 % урана, 14 % алюминия и 10,6 % железа, остальные 40,4 % занимали пустоты. Общее количество урана в АЗ составляло 140 кг.

Нижний отражатель быстрой АЗ состоял из слоя природного урана толщиной 15,24 см и слоя железа той же толщины, верхний отражатель – из слоя природного урана толщиной 10,16 мм и слоя железа толщиной 20,32 см.

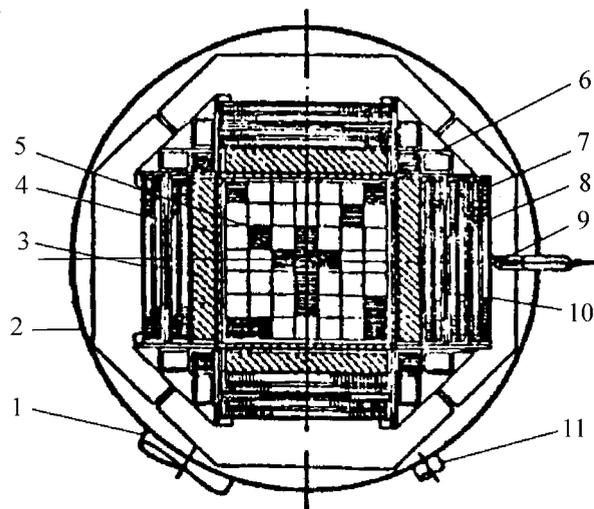


Рис. 1. Структура реактора ZPR-V в горизонтальном разрезе [3]: 1 – дренажная линия кольцевого бака; 2 – кольцевой бак; 3 – урановая зона воспроизводства; 4 – внутренний бак; 5 – быстрая АЗ; 6 – опора тепловой АЗ; 7 – тепловая кольцевая АЗ; 8 – стержень аварийной защиты; 9 – нейтронный источник; 10 – регулирующий стержень; 11 – дренажная линия внутреннего бака

### Импульсные связанные реакторы

С 1970-х гг. концепция связанных реакторов стала эффективно применяться в области аperiодических импульсных реакторов (АИР). Анализ свойств связанных АИР впервые был выполнен во ВНИИЭФ в 1970–1971 гг. Было дано теоретическое описание кинетики связанных АИР, сформулированы выводы о своеобразии переходных процессов в этих устройствах и выполнены расчеты нескольких конкретных комбинаций из быстрого импульсного реактора (БИР) + подкритическая сборка (ПС), растворного импульсного реактора (ВИР) + ПС и др. Было показано, что АИР связанного типа существенно расширяют возможности импульсных экспериментов на реакторах. Оснащение импульсного реактора связанным с ним другим импульсным реактором или связанной с ним ПС позволяет (в зависимости от преследуемых целей) или во много раз увеличивать объем экспериментальной полости для облучения образцов, или получать в этой полости более высокие флюенсы нейтронов. Было показано также, что оснащение АИР подкритической сборкой в большинстве случаев не влечет за собой существенного изменения переходных характеристик самого АИР и требований к его органам управления. (В контексте настоящей статьи подкритическая сборка отличается от АИР лишь тем, что в ней в силу ли малости коэффициента гашения реактивности, в силу ли глубокой подкритичности на всех этапах переходных процессов обратная связь по реактивности в уравнениях кинетики не имеет существенного значения, и при желании ею можно пренебречь.)

Общие результаты этой работы были опубликованы в 1975 г. [4], сведения по кинетике конкретных комбинаций АИР + ПС и требованиям к органам управления АИР – в 1991 г. [5] (см. также монографию [6]).

**Уравнения кинетики и динамики связанных АИР.** Уравнения кинетики связанных АИР были записаны в работе [4] на основе рассмотрения баланса нейтронов в каждом реакторе по аналогии с выводом обычных уравнений кинетики:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= \frac{k_{11}(1-\beta)-1}{\tau_{11}} N_1 + \frac{k_{12}(1-\beta)}{\tau_{22}} N_2 [t - (\tau_{12} - \tau_{11})] + \\ &+ \sum_{i=1}^D \lambda_i \{ k_{11} C_{1i} + k_{12} C_{2i} [t - (\tau_{12} - \tau_{11})] \} + S_1(t); \\ \frac{dN_2}{dt} &= \frac{k_{22}(1-\beta)-1}{\tau_{22}} N_2 + \frac{k_{21}(1-\beta)}{\tau_{11}} N_1 [t - (\tau_{21} - \tau_{22})] + \\ &+ \sum_{i=1}^D \lambda_i \{ k_{22} C_{2i} + k_{21} C_{1i} [t - (\tau_{21} - \tau_{22})] \} + S_2(t); \\ \frac{dC_{ji}}{dt} &= \frac{\beta_i}{\tau_{jj}} N_j - \lambda_i C_{ji}; \quad j = 1, 2; \end{aligned} \tag{1}$$

$$i = 1, 2, \dots, D \quad (i = \overline{1, D}),$$

где  $N_j$  и  $C_{ji}$  – число нейтронов и источников запаздывающих нейтронов группы  $i$  в  $j$ -м реакторе в момент времени  $t$ ;

$k_{jj}$  и  $\tau_{jj}$  – коэффициент размножения (с учетом запаздывающих нейтронов) и среднее время жизни мгновенных нейтронов в  $j$ -м реакторе при отсутствии другого реактора;

$k_{jk}$  – коэффициент размножения нейтронов в  $j$ -м реакторе, относящийся к нейтронам  $k$ -го реактора (коэффициенты связи двух реакторов);

$\tau_{jk}$  – среднее время жизни мгновенного нейтрона, родившегося в реакторе  $k$  и вызвавшего деление в реакторе  $j$ ;

$\lambda_i$ ,  $\beta_i$  и  $\beta = \sum_{i=1}^D \beta_i$  – параметры запаздывающих нейтронов (предполагаются одинаковыми для обоих реакторов);

$D$  – число групп запаздывающих нейтронов;

$S_j$  – внешний источник нейтронов в реакторе  $j$  (нейтр./с);

сдвиг аргумента ( $\tau_{jk} - \tau_{jj}$ ) – время от рождения нейтрона в реакторе  $k$  до прилета этого нейтрона в реактор  $j$  (имеются в виду нейтроны, вызывающие деления в реакторе  $j$ ).

Было показано, что система уравнений (1) с точностью до малых величин второго порядка подобна уравнениям в формулировке Р. Эйвери [1], хотя внешне система уравнений Эйвери отличается от системы (1) двумя дополнительными уравнениями и отсутствием членов с запаздывающим аргументом.

Расчеты динамики связанных АИР проводились преимущественно на основе численных решений более полных уравнений, в которых:

– введены уравнения реактивной обратной связи в секциях в форме, характерной для быстрых АИР;

– учтено возможное несовпадение  $\beta_j$ , а также чисел нейтронов на акт деления для разных секций;

– величина  $N_j$  заменена на  $n_j$  – интенсивность делений в секциях в момент  $t$  ( $n_j = N_j / [v_j \tau_j]$ );

–  $k_{jj}$ ,  $\tau_{jj}$  обозначены как  $k_j$ ,  $\tau_j$ ;

$$\begin{aligned} v_1 \tau_1 \frac{dn_1}{dt} &= v_1 \left[ k_1 (1 - \beta^{(1)}) - 1 \right] n_1 + v_2 k_{12} (1 - \beta^{(2)}) n_2 [t - (\tau_{12} - \tau_1)] + \\ &+ k_1 \sum_{i=1}^{l_1} \lambda_i C_i^{(1)} + k_{12} \sum_{i=1}^{l_2} \lambda_i C_i^{(2)} [t - (\tau_{12} - \tau_1)] + S_1(t); \\ v_2 \tau_2 \frac{dn_2}{dt} &= v_2 \left[ k_2 (1 - \beta^{(2)}) - 1 \right] n_2 + v_1 k_{21} (1 - \beta^{(1)}) n_1 [t - (\tau_{21} - \tau_2)] + \\ &+ k_2 \sum_{i=1}^{l_2} \lambda_i C_i^{(2)} + k_{21} \sum_{i=1}^{l_1} \lambda_i C_i^{(1)} [t - (\tau_{21} - \tau_2)] + S_2(t); \\ \frac{dC_i^{(1)}}{dt} &= v_1 \beta_i^{(1)} n_1 - \lambda_i C_i^{(1)}; \quad \frac{dC_i^{(2)}}{dt} = v_2 \beta_i^{(2)} n_2 - \lambda_i C_i^{(2)}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$k_1(t) = k_1^0(t) - a_0^{(1)} \int_0^t n_1(t) dt - \sum_{m=1}^M a_m^{(1)} v_m^{(1)}(t); \quad k_2(t) = k_2^0(t) - a_0^{(2)} \int_0^t n_2(t) dt - \sum_{m=1}^M a_m^{(2)} v_m^{(2)}(t);$$

$$\frac{1}{(\omega_m^{(1)})^2} \frac{d^2 v_m^{(1)}}{dt^2} = \int_0^t n_1(t) dt - v_m^{(1)}(t); \quad \frac{1}{(\omega_m^{(2)})^2} \frac{d^2 v_m^{(2)}}{dt^2} = \int_0^t n_2(t) dt - v_m^{(2)}(t);$$

$$i = 1, 2, \dots, l_1(l_2); \quad m = 1, 2, \dots, M.$$

Здесь  $\beta_i^{(j)}$  и  $\beta^{(j)} = \sum_{i=1}^{l_j} \beta_i^{(j)}$  – относительные доли запаздывающих нейтронов (натуральных и отраженных от стен реакторного помещения) в секции  $j$ ;

$k_j^0(t)$  – значения  $k_j(t)$  без учета влияния обратной связи;

$a_0^{(j)} \int_0^t n_j(t) dt$  – вклад в  $k_j(t)$  от безынерционного, не связанного с тепловым расширением

АЗ температурного эффекта реактивности;

$a_m^{(j)} v_m^{(j)}(t)$  – вклад в  $k_j(t)$  от составляющей (или гармоники) смещений при тепловом расширении АЗ, которому в общем случае присуще инерционное запаздывание;

$v_m^{(j)}$  – условная амплитуда  $m$ -й составляющей смещений, определяемая как решение уравнения для колебательной системы с круговой частотой  $\omega_m^{(j)}$ ;

параметры  $a_m^{(j)}$  – парциальные квазистатические коэффициенты гашения реактивности.

Система уравнений (2) при дополнении ее начальными значениями  $n_j$ ,  $C_i^{(j)}$ ,  $v_m^{(j)}$  и  $dv_m^{(j)}/dt$  дает полное описание переходных явлений в двух связанных АИР (в рамках точечной кинетической модели для каждой секции). Полные решения уравнений (2) определялись численно.

**Аналитические решения.** В общем виде уравнения (2) нельзя решить аналитически. Такие решения удастся найти только при фиксированных значениях  $\Delta \tilde{k}_1^0$ ,  $\Delta \tilde{k}_2^0$  (ступенчатое введение начальной реактивности). Для последнего варианта получено:

1. В варианте связанной системы в виде АИР + ПС наиболее важная характеристика переходных процессов в связанных реакторах – полное число делений в секциях за импульс – определяется соотношениями

$$J_{1\infty} = \frac{2\Delta \tilde{k}_1^0}{a^{(1)}} \left( 1 - \frac{k_{12}k_{21}}{\Delta \tilde{k}_1^0 \Delta \tilde{k}_2^0} \right); \quad (3)$$

$$J_{2\infty} = -\frac{k_{21}}{\Delta \tilde{k}_2^0} J_{1\infty}.$$

Из решений (3), в частности, следует, что учет запаздывания в поступлении нейтронов из одной секции в другую не приводит к какому-либо изменению полного энерговыделения в импульсе или отношения энерговыделений в секциях.

2. В варианте связанной системы АИР + АИР, гашение реактивности в которой осуществляется в обеих секциях, но не содержит эффектов инерционного запаздывания, связь  $J_1, J_2$  с начальными реактивностями секций имеет вид

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{k}_1^0 &= \frac{a^{(1)}}{2} J_1 - \frac{\nu_2 k_{12}}{\nu_1} \frac{J_2}{J_1} - \frac{\tau_1 n_1(0)}{J_1}, \\ \Delta\tilde{k}_2^0 &= \frac{a^{(2)}}{2} J_2 - \frac{\nu_1 k_{21}}{\nu_2} \frac{J_1}{J_2} - \frac{\tau_2 n_2(0)}{J_2}.\end{aligned}\quad (4)$$

3. В варианте связанной системы АИР + АИР с инерционным гашением реактивности в обеих секциях, представляемым единственной в каждой секции гармоникой колебаний с параметрами  $\omega_1^{(j)}, a_1^{(j)}$  ( $j = 1, 2$ ), связь  $J_1, J_2$  с начальными реактивностями секций имеет вид

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{k}_1^0 &= \frac{a_1^{(1)}}{2} \left[ 1 - \left( \frac{\gamma_1^{(1)}}{Sh\gamma_1^{(1)}} \right)^2 \right] J_1 - \\ &\quad - \frac{\nu_2 k_{12}}{\nu_1} \frac{J_2}{J_1} - \frac{\tau_1 n_1(0)}{J_1},\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{k}_2^0 &= \frac{a_1^{(2)}}{2} \left[ 1 - \left( \frac{\gamma_1^{(2)}}{Sh\gamma_1^{(2)}} \right)^2 \right] J_2 - \\ &\quad - \frac{\nu_1 k_{21}}{\nu_2} \frac{J_1}{J_2} - \frac{\tau_2 n_2(0)}{J_2}, \quad \gamma_1^{(j)} = \frac{\pi \omega_1^{(j)} T_j}{3,5255}.\end{aligned}\quad (6)$$

Параметры  $T_1, T_2$  в соотношениях (5), (6) – это приближенные значения ширин импульсов делений на половине высоты в секциях 1, 2. При больших значениях  $\omega_1^{(1)}, \omega_1^{(2)}$  соотношения (5), (6) переходят в точные соотношения (4). Эти формулы легко обобщаются на случай более сложных обратных связей, представляемых неограниченным рядом гармоник с различными парциальными коэффициентами гашения реактивности и частотами колебаний.

Из (4), как и из (5), (6), могут быть определены также явные зависимости  $J_1, J_2$  от реактивности  $\Delta\tilde{k}_1^0, \Delta\tilde{k}_2^0$ . Соответствующие соотношения значительно сложнее обратных им связей (4)–(6). При необходимости эти соотношения можно найти как корни полиномов третьей или даже четвертой степени.

Ряд данных о свойствах связанных импульсных реакторов был получен путем параметрического анализа заметно редуцированного варианта уравнений (2). Численное решение параметризованных уравнений показало, например, что ширины импульсов в секциях, за исключением немногих случаев, отличаются не более чем в 1,5 раза. Сдвиг импульса во 2-й секции по отношению к импульсу в 1-й невелик, обычно не превышает 1/3 ширины импульса. Формы импульсов делений

в каждой секции системы в сравнении с симметричной формой в односекционном реакторе отличаются несколько затянутым спадом. Наиболее четко эта особенность проявляется в отсутствие гашения реактивности во 2-й секции, т. е. в случае систем АИР + ПС.

### *Другие подходы к теоретическому описанию кинетики связанных АИР*

В некоторых случаях рассмотрение систем связанных реакторов допустимо проводить в рамках более простой одноточечной модели кинетики. Этот подход правомерен в отношении таких систем, которые ведут себя как единый реактор с неизменным на всех стадиях переходных процессов профилем пространственного распределения потока нейтронов в АЗ. Это так называемые сильно-связанные реакторные системы. Теоретический анализ кинетики таких систем был выполнен в работах [7, 8] и др. В работе [7] определены условия, при которых двухсекционная система является сильно- или слабосвязанной. Там же получены весьма точные аналитические формулы для ширины импульсов в секциях сильносвязанной реакторной системы. В работе [8] рассмотрены особенности переходных нейтронных процессов в сильносвязанной системе, состоящей из импульсного реактора и ПС. Оценено влияние ПС на параметры импульсов делений в реакторе. В результате выполненных расчетов показано, как и ранее в статье [4], что в системах, состоящих из ПС и АИР (типа БИР, Godiva, SPR-II) могут быть обеспечены высокие флюенсы нейтронов в больших внутренних полостях ПС при сравнительно небольшом увеличении длительности импульса АИР.

Констатация факта применимости одноточечной модели к конкретной двухсекционной системе может существенно упростить задачу управления ею. В этом аспекте выделение сильносвязанных систем в отдельную группу и возложение на операторов дополнительной заботы о соблюдении в операциях условий применимости одноточечной модели становятся оправданными.

Представленная выше двухточечная модель кинетики и динамики связанных АИР (уравнения (1), (2)) в целом удовлетворительно описывает нейтронные переходные процессы в таких системах. Тем не менее известно, что по ряду позиций, и особенно в части воспроизведения деталей пространственно-временного распределения поля нейтронов в больших реакторных системах, двухточечная модель требует серьезных уточнений. Более поздние разработки в области кинетики связанных реакторов базируются преимущественно на интегральной форме уравнения Больцмана. При этом чаще всего используется приближение, в котором определяемой величиной в уравнениях является плотность делений. Благодаря этому удается исключить зависимость искомых величин от угловой и энергетической переменных.

В целях проведения практических расчетов используются эффективные  $N$ -зонные представления интегральных моделей, позволяющие сводить общие интегральные соотношения к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Расчет параметров  $N$ -зонной кинетики в этом приближении в значительной степени опирается на возможности программ Монте-Карло. При таком подходе удается преодолевать существенные вычислительные трудности расчета систем со сложной геометрической конфигурацией.

В статьях [9, 10] вывод уравнений  $N$ -зонной кинетики реактора основан на интегральном уравнении для пространственно-временной плотности делений  $p(\vec{r}, t)$  в АЗ реакторной системы

$$p(\vec{r}, t) = \int_{t_0}^t dt' \int d\vec{r}' G(\vec{r}, \vec{r}', t, t') p(\vec{r}', t') + q(\vec{r}, t), \quad (7)$$

где  $G(\vec{r}, \vec{r}', t, t')$  – пространственно-временная плотность вторичных делений в точке  $\vec{r}$  реактора в момент времени  $t$  при условии, что первичное деление имело место в точке  $\vec{r}'$  в момент времени  $t'$ ;  $q(\vec{r}, t)$  – пространственно-временная плотность делений, вызванных не зависящими от реактора источниками.

Весь объем реактора при этом разбивается на  $N$  пространственных зон, в пределах каждой из которых пространственная и временная зависимости приближенно разделяются. (Уравнение типа (7) использовалось в работе [11] и некоторых более ранних работах.)

В работах [12, 13] сформулирован получивший практическое применение ряд моделей пространственно-временной кинетики, также основанных на интегральной форме уравнения Больцмана. Эти модели разработаны применительно, прежде всего, к расчетам сложных импульсных систем и связаны с необходимостью корректного учета высших пространственных гармоник нейтронного потока.

Указанные модели реализованы в программах для ЭВМ и интенсивно используются в практических расчетах связанных реакторно-лазерных и других устройств, а также в расчетах пространственно-временной кинетики реакторов в целом. Из этих расчетов следует, что учет высших гармоник и переход к моделям с большим числом зон заметно повышает точность результатов. В качестве примера на рис. 2 приведен результат расчета с учетом и без учета высших гармоник интенсивности делений в секциях импульсной реакторной установки, состоящей из АИР на быстрых нейтронах и ПС.

Согласно [12–14] пространственное распределение нейтронного потока в ведомых подкритических сборках обычно сильно изменяется в течение импульса.

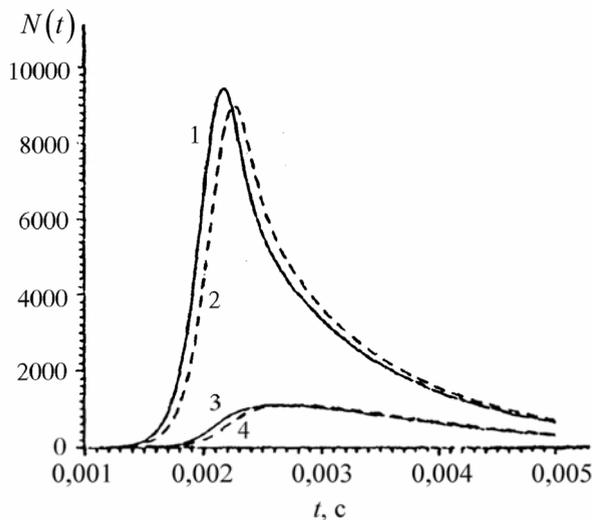


Рис. 2. Интенсивность делений в АЗ (1, 2) и размножающем отражателе (3, 4) [14]: — – расчет по модели с учетом высших гармоник; - - - – расчет по модели работы [4], не учитывающей высшие гармоники

### Экспериментальное исследование связанных АИР

Под прямым влиянием результатов теоретической работы [4] во ВНИИЭФ, ВНИИТФ (г. Снежинск) и ФЭИ (г. Обнинск) были выполнены серии разносторонних экспериментов по кинетике связанных систем в виде АИР + ПС или АИР + АИР.

Системы, исследованные в работе ВНИИЭФ [15], содержали АИР БИР-2 и четыре взаимозаменяемые ПС. В процессе эксперимента измеряли:

- реактивности изолированных БИР и ПС;
- стартовую (перед вводом импульсного стержня в АЗ) и избыточную (после ввода импульсного стержня в АЗ) реактивность связанной системы;
- распределение чисел делений и флюенсов нейтронов в АЗ БИР и ПС, а также в пространстве между ними в условиях стационарного и импульсного режимов работы;
- временные характеристики размножения мгновенных нейтронов в связанной системе;
- параметры импульсов делений в каждой секции.

В целях проведения указанного эксперимента в дополнение к штатному оборудованию реактора БИР-2 было создано устройство дистанционного сближения ПС и реактора БИР-2. Общий вид этой системы схематически показан на рис. 3. Устройство дистанционного сближения, помимо перемещения ПС по горизонтали, позволяло также дистанционно сближать и разводить составные части ПС в вертикальном направлении. Подобранные для экспериментов ПС существенно отличались по своим характеристикам.

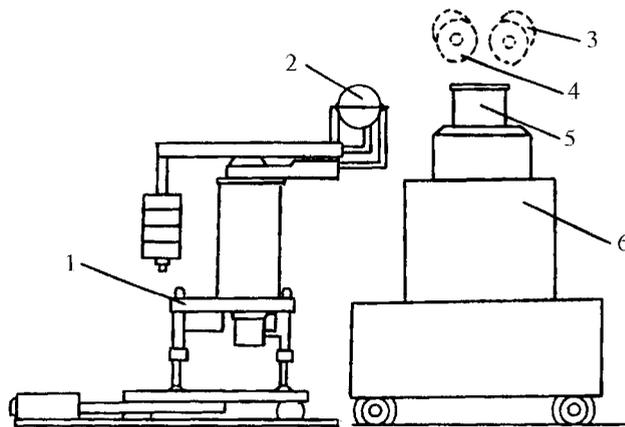


Рис. 3. Схема эксперимента со связанными системами реактор БИР + ПС [15]:

- 1 – устройство дистанционного сближения БИР и ПС; 2 – ПС; 3, 4 – счетчики нейтронов;  
5 – АЗ реактора БИР; 6 – стенд БИР

Сопоставляя результаты работы [15] с предпосылками теоретического анализа, прежде всего следует отметить тот факт, что пространственное распределение потока нейтронов в глубоко подкритических секциях заметно отличается от собственных функций этих секций в критическом состоянии. Это обстоятельство указывает на желательность, а в некоторых ситуациях и необходимость учета в расчетах связанных реакторов аппарата  $N$ -зонной пространственно-временной кинетики.

В других отношениях полученные в работе [15] экспериментальные данные по характеристикам связанных систем АИР + ПС качественно согласуются с выводами представленного в предыдущих разделах теоретического рассмотрения.

Во ВНИИТФ исследования проводились на связанной системе из реакторов ЭБР и РУС – двух быстрых АИР с металлическими АЗ [16].

Для проведения экспериментов АЗ реактора РУС вместе с механическими структурами и элементами управления монтировали на платформе, перемещаемой относительно ЭБР. Расстояние между центрами реакторов можно было изменять в диапазоне от 35 до 200 см. Минимальное расстояние между поверхностями реакторов составляло при этом ~0,3 см.

Значительное место в работе [16] отведено вопросам выявления области значений параметров, в которой система ЭБР + РУС может быть отнесена к разряду «сильносвязанных» систем и описана с помощью одноточечной модели кинетики. Большое внимание уделено также прямой проверке формул связи глобальной реактивности, времени жизни мгновенных нейтронов и коэффициентов гашения со значениями этих параметров в секциях.

Сравнение данных эксперимента на ЭБР + РУС с теоретическими предсказаниями показало, что двухточечная модель кинетики связанных реакторов хорошо описывает эксперимент на этой системе во всей испытанной области изменения параметров. Видно также, что при малых (0,3–25 см) расстояниях между внешними поверхностями ЭБР и РУС даже одноточечная модель удовлетворительно воспроизводит данные эксперимента.

Для расчетно-экспериментального исследования связанных реакторных систем в ФЭИ был построен критический стенд УКС-1М [13]. Основными целями экспериментов на стенде были исследование процессов, происходящих в связанной системе типа реактор + ПС и совершенствование методов расчетного и экспериментального анализа характеристик связанных реакторных систем, работающих в импульсном режиме.

Стенд УКС-1М представляет собой систему из двух размножающих зон, вложенных одна в другую. Конструктивно это вертикальная шестигранная призма, образованная рядами трубных элементов, устанавливаемых на двух разных опорных плитах по правильной треугольной решетке. Общий вид и схема конструкции стенда показаны на рис. 4. Подкритическая внешняя секция стенда УКС-1М образована рядами трубных элементов, установленных по правильной треугольной решетке с шагом 51 мм. Общее число таких элементов 858 (13 рядов). Характерный внешний диаметр секции 198,7 см, внутренний диаметр 45,7 см, высота 150 см.

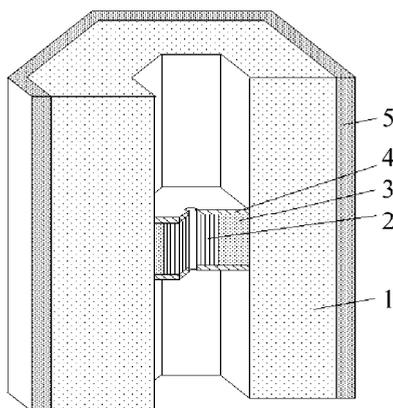


Рис. 4. Общий вид стенда УКС-1М [13]: 1 – внешняя размножающая зона; 2 – центральная размножающая зона; 3 – внутренний боковой отражатель; 4 – торцевой отражатель; 5 – наружный боковой отражатель

Центральная секция стенда УКС-1М расположена внутри внешней секции (геометрический центр внутренней секции находится на полувысоте внешней секции) и является малогабаритным

уран-молибденовым реактором на быстрых нейтронах. Активная зона реактора состоит из 37 твэлов, содержащих металлический уран высокого обогащения по  $^{235}\text{U}$ . Внешний диаметр центральной секции 42,7 см, полная высота 47,2 см, высота активной зоны 24,6 см.

С внешней стороны секции стенда окружены отражателем нейтронов, образованным двумя рядами стержней из полиэтилена.

В экспериментах на стенде УКС-1М основное внимание уделяли измерениям пространственно-временных распределений нейтронов во внешней секции при различных конфигурациях двухсекционной системы. Исследовали случаи, когда центральная секция полностью отсутствует, когда твэлы центральной секции заменены молибденовыми стержнями, когда присутствуют обе секции.

В результате сравнения экспериментальных и расчетных данных сделан вывод: при моделировании кратковременных переходных процессов на стенде УКС-1М подход, основанный на использовании простых точечных моделей кинетики, неприменим. В этом случае необходимо использовать модели, корректно учитывающие пространственно-временные неоднородности нейтронного потока.

Независимо от нескольких ранее указанных российских работ в Иллинойском университете США была экспериментально исследована кинетика связанной системы в виде комбинации из ведущего импульсного реактора TRIGA и ведомого реактора LOPRA [17]. Каждый реактор системы мог быть сделан критическим. Реакторы были связаны через графитовую тепловую колонну. Предполагалось, что вследствие слабой связи секций и малых размеров АЗ указанная система будет хорошо описываться с помощью двухточечной модели кинетики. Проверка этого утверждения являлась одной из наиболее важных целей исследования.

Конфигурация связанной системы показана на рис. 5. Реактор TRIGA мог действовать в стационарном режиме на уровне мощности до 1,5 МВт и давать импульсы делений с мощностью в пике до 1500 МВт с шириной на половине высоты 11 мс. В реакторе LOPRA была разрешена работа в стационарном режиме на мощности до 10 кВт, в импульсном режиме – с мощностью в пике до 10 МВт.

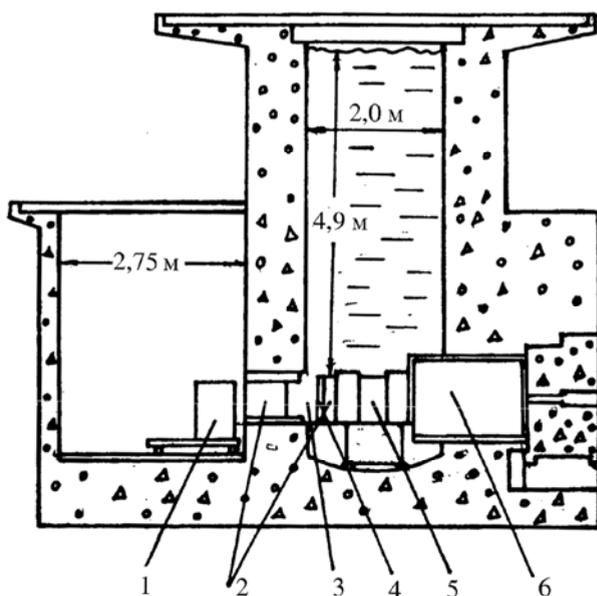


Рис. 5. Вид (в разрезе) связанной системы TRIGA + LOPRA [17]: 1 – АЗ реактора LOPRA; 2 – графит тепловой колонны; 3 – пустота; 4 – свинец; 5 – АЗ реактора TRIGA; 6 – графит

В процессе измерений на системе TRIGA + LOPRA экспериментально определяли:

- коэффициенты нейтронной связи секций  $k_{21}$ ,  $k_{12}$ ;
- влияние на эти коэффициенты воды и кадмия, помещаемых в зазор между реактором LOPRA и лицевой стороной тепловой колонны;
- абсолютные значения пиков мощности в импульсе;
- время запаздывания между пиками импульсов в секциях;
- ширины на половине высоты импульсов в секциях;
- показатель асимметрии импульса в LOPRA.

В качестве итога исследования было отмечено, что простая двухточечная модель кинетики в применении к системе TRIGA + LOPRA весьма хорошо воспроизводит усредненные по объему секций значения потока нейтронов и другие параметры импульсов. Тем не менее в системе проявляются пространственные эффекты, которые требуют детального пространственно-временного расчетного анализа.

### Действующие связанные АИР

Полученные экспериментальные данные в целом подтвердили общие закономерности и свойства связанных АИР, следующие из теоретических рассуждений.

В течение последующих лет ряд схем связанных АИР был реализован в виде двухсекционных или даже трехсекционных действующих установок или заложен в важные проекты, например в проекты мощных лазеров с ядерной накачкой [18]. Из действующих (или действовавших) установок необходимо отметить:

- эксплуатируемый с 1980-х гг. в НИИП (г. Лыткарино Московской обл.) импульсный реактор с двумя АЗ БАРС-4 [19];
- запущенный в 1980-х гг. во ВНИИТФ (г. Снежинск) импульсный реактор с двумя АЗ БАРС-5 [20];
- запущенный там же в 1994 г. импульсный реактор с тремя АЗ БАРС-5 + РУН (рис. 6) [21];

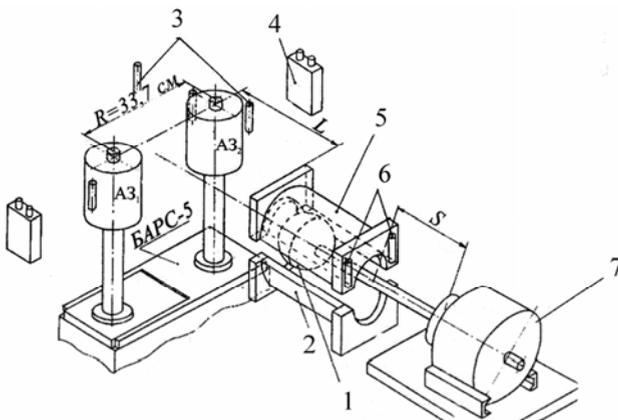


Рис. 6. Схема комплекса БАРС-5 + РУН [21]:  
 1 – капсула для образцов; 2, 5 – нижний и верхний блоки РУН;  
 3 – детекторы формы нейтронного импульса; 4, 6 – детекторы мощности БАРС-5 и РУН; 7 – загрузочное устройство;  
 $R$  – расстояние между осями АЗ БАРС-5;  $L$  – расстояние между БАРС-5 и РУН. Стенд умножителя не показан

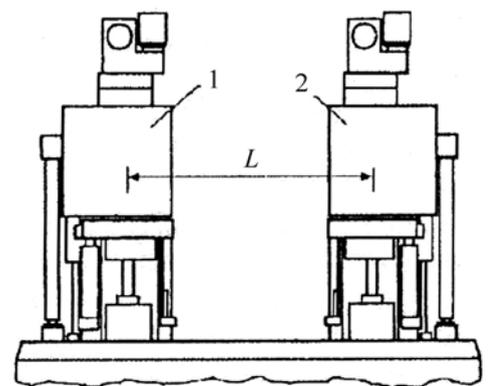


Рис. 7. Схема расположения на платформе подвижной (1) и неподвижной (2) АЗ реактора БАРС-6 ( $L$  – расстояние между АЗ) [13]

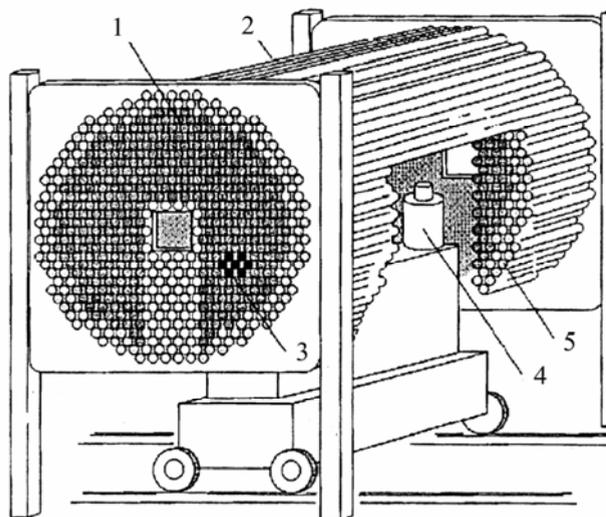


Рис. 8. Схема комплекса БАРС-6 + подкритический лазерный блок «Стенд Б» [22]: 1 – лазерно-активный элемент; 2 – лазерный блок; 3 – имитаторы лазерно-активного элемента; 4 – АЗ БАРС-6; 5 – отражатель нейтронов

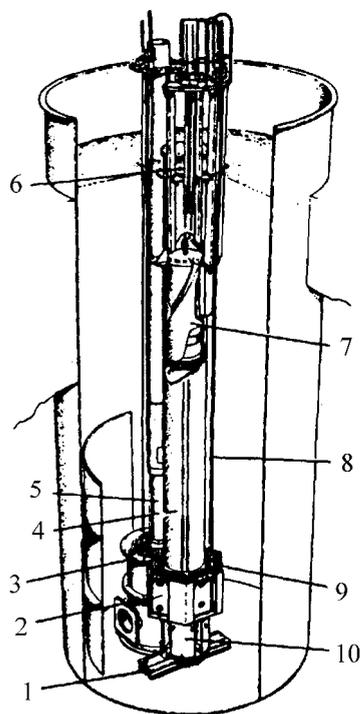


Рис. 9. Реактор ACRR с подкритической сборкой FREC-II [23]: 1 – опора ПС; 2 – пустотная камера; 3 – АЗ реактора ACRR; 4 – полость диаметром 51 см; 5 – полость диаметром 22,8 см; 6 – приводы стержней безопасности FREC-II; 7 – защитная вставка FREC-II; 8 – стержень безопасности FREC-II; 9 – ПС FREC-II; 10 – балласт

– запущенный в 1995 г. в ФЭИ (г. Обнинск) импульсный реактор с двумя АЗ БАРС-6 (рис. 7) [13];

– введенный в действие там же в 1999 г. реакторный «Стенд Б» с тремя АЗ (рис. 8) [22];

– связанную систему из импульсного реактора ACRR и ПС с большой полостью FREC, действовавшую в Сандийской лаборатории (Айдахо, США) (рис. 9) [23].

ПС FREC эксплуатировали последовательно в двух модификациях. Первая версия ПС FREC-I имела полость диаметром 38 см, в 1988 г. она была заменена на FREC-II с полостью диаметром 50 см.

Указанные двухсекционные реакторы предоставили существенные новые возможности для облучения больших узлов техники, сборок реакторных топливных элементов, для исследования реакторно-лазерных устройств и т. п.

## Список литературы

1. Avery R. Theory of coupled reactors // Proc. of the 2<sup>nd</sup> United Nations International Conf. on the peaceful uses of atomic energy. Geneva, Switzerland, 1–13 September 1958. Vol. 12. P. 182–191.
2. Avery R., Branyan C. E., Brunson G. S. et al. Coupled fast-thermal power breeder critical experiment // Ibid. P. 151–165.
3. Hummel H. H., Cohn C. E., Fischer G. J. et al. Experimental and theoretical studies of the coupled fast-thermal system ZPR-V // Ibid. P. 166–181.
4. Колесов В. Ф., Петров Ю. В., Штарев С. К. Кинетика системы связанных импульсных реакторов // Атомная энергия. 1975. Т. 39. Вып. 6. С. 392–396.
5. Колесов В. Ф., Штарев С. К. О расчетах переходных процессов в системах связанных импульсных реакторов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1991. Вып. 2. С. 27–47.
6. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. Т. 2.
7. Лукин А. В. О параметрах импульсов делений в связанных реакторах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. Вып. 4. С. 3–13.
8. Лукин А. В. Особенности динамики связанной системы из импульсного реактора и подкритической сборки // Там же. 1991. Вып. 2. С. 47–50.
9. Хоружий В. Х., Колесов В. Ф. О некоторых численных методах расчета быстрых импульсных ядерных реакторов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1987. Вып. 1. С. 12–21.
10. Хоружий В. Х. К расчету пространственно-временной кинетики ИЯР и бустера // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1989. Вып. 1. С. 3–7.
11. Кочкин В. И., Шабалин Е. П. Эффективная одноточечная модель кинетики размножающей среды с реальными геометрическими и физическими свойствами : препринт ОИЯИ № 11–5407. – Дубна, 1970.
12. Пупко С. В. Модель пространственной кинетики реактора : препринт ФЭИ № 2054. – Обнинск, 1989.
13. Гулевич А. В., Дьяченко П. П., Зродников А. В., Кухарчук О. Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. – М.: Энергоатомиздат, 2003.
14. Гулевич А. В., Кухарчук О. Ф., Полевой В. Б., Пупко С. В. Применение интегральной модели нейтронной кинетики к расчету многозонных размножающих систем : препринт ФЭИ № 2129. – Обнинск, 1990.
15. Кувшинов М. И., Чередник П. Ф., Игнатов И. И. и др. Экспериментальные исследования связанных систем, содержащих импульсный реактор БИР и подкритическую сборку // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1988. Вып. 2. С. 3–15.

16. Magda E. P. Experimental investigation into the kinetics of two coupled pulse reactor // Proc. of the Int. Topical Meeting on physics, safety, and applications of pulse reactors. Washington, D.C., November 13–17, 1994. P. 316–329.

17. Thayer G. R., Miley G. H., Jones B. G. An experimental study of two coupled reactors // Nucl. Tech. 1975. Vol. 25, N 1. P. 56–67.

18. Зродников А. В. Перспективы применения лазеров с ядерной накачкой в науке, технике и технологии // Материалы междунаро. конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой». – Обнинск, 1992. Т. 1. С. 122–143.

19. Членов А. М., Улимов В. М., Маркитан Д. И. и др. Исследовательские реакторы ВНИИП. Исследование радиационной стойкости изделий отечественной электроники и электротехники // Междун. конф. «Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии». – Димитровград, 2002. Т. 3, ч. 2. С. 14–31.

20. Снопков А. А., Черашев В. И., Литвин В. И. и др. Протяженный нейтронный источник на базе двухсекционного импульсного реактора БАРС-5 // Там же. С. 144–156.

21. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Магда Э. П. и др. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.

22. Дьяченко П. П., Еловский О. А., Прохоров Ю. А. и др. Реакторно-лазерный комплекс «Стенд Б» // Атомная энергия. 2000. Т. 88. Вып. 5. С. 337–342.

23. Rubio R. A., Cooper P. J., Schulze J. F. et al. FREC-II: an upgrade to SNL Annular Core Research Reactor // Trans. Amer. Nucl. Soc. 1989. Vol. 59 (Suppl. 1). P. 55–56.

## History of Formation and Practical Realization of Coupled Reactor Concept

V. F. Kolesov

*The history of formation and practical realization of a concept of coupled reactor facilities that was embodied in the sphere of aperiodic pulsed reactors is traced back. It is demonstrated that the application of the concept of coupled reactor facilities extends essentially the potentialities of the executed on reactor experiments.*