

# Физические аспекты использования жидкосолевых реакторов для покрытия переменных нагрузок

субботин в. и., блинкин в. л., новиков в. м., шкуренев а. а.

Возрастание доли ядерной энергетики в общем энергетическом балансе приводит к необходимости работы части АЭС в режиме полупиковых нагрузок, что связано с рядом трудностей. Во-первых, при периодическом изменении мощности в твэлах реактора возникают термоциклические напряжения, которые могут привести к их разрушению. Во-вторых, в реакторах с твердыми твэлами возникает ксеноновое отравление реактора при уменьшении его мощности. Например, в ВВЭР-1000 через 9 ч после его останова уменьшение реактивности превысит 3%, что потребует для его пуска в этот момент значительного оперативного запаса реактивности, существенно ухудшающего экономические показатели реактора при таком режиме работы, и приведет к большим перекосам энергораспределения.

Эти проблемы можно обойти или по крайней мере значительно облегчить, если использовать реактор с жидким ядерным топливом, например жидкосолевой реактор (ИСР). Действительно, в таком реакторе топливо находится в составе расплавленных солей и проблема термоциклических напряжений в твэлах исключается. Газообразные продукты деления (криптон и ксенон) малорастворимы в расплавах солей. Это делает возможным их выведение из циркулирующего топлива, и таким образом снимается проблема ксенонового отравления реактора при снижении его мощности.

Цель настоящей работы — исследование особенностей работы жидкосолевых реакторов в режиме переменных нагрузок. В дальнейшем для определенности будем исходить из параметров, которые заложены в проект жидкосолевого реактора MSBR-1000 тепловой мощностью 2250 МВт [1], представляющего собой тепловой уран-ториевый реактор-размножитель с графитовым замедлителем и отражателем, через активную зону которого циркулирует расплав солей  $\text{LiF}$ ,  $\text{BeF}_2$ ,  $\text{ThF}_4$  и  $^{233}\text{UF}_4$ . Соль выполняет функции теплоносителя, носителя воспроизводящего материала и делящегося топлива. Циркуляция соли в замкнутом контуре позволяет осуществить непрерывное выведение из нее газообразных продуктов деления методом газовой продувки.

Следует отметить, что некоторые проблемы, связанные с работой энергоустановки в режиме переменной мощности, относятся к работе парового контура и турбин. Эти проблемы являются общими для энергоустановок любого типа, использующих в качестве преобразователя энергии паротурбогенератор, и в настоящей работе не рассматриваются. Укажем только, что жидкосолевые реакторы могут работать при температуре теплоносителя 700—900° С. Поэтому в качестве преобразователя энергии здесь могут быть использованы газотурбогенераторы, позволяющие значительно легче обеспечить работу энергоустановки в широком диапазоне мощностей, чем паротурбогенераторы.

## Кинетика жидкосолевого реактора

Мощность энергоустановки, работающей в режиме полупиковых нагрузок, должна меняться в зависимости от потребности в электроэнергии в различное время суток и различные дни недели. Анализ потребностей в электроэнергии приводит к требованию, чтобы такая энергоустановка допускала ежесуточные остановы на 6—8 ч с последующим набором мощности примерно за 1 ч, а также еженедельные остановы на 1—2 сут в нерабочие дни недели. Кроме того, необходимо, чтобы энергоустановка в часы своей работы могла периодически изменять мощность в пределах регулировочного диапазона (30—100% номинальной мощности) примерно за 10—20 мин. Небольшие изменения мощности на  $\pm 10\%$  номинального значения должны происходить достаточно быстро — примерно за 5 с.

Оценим возможность обеспечения этих режимов жидкосолевым ядерным реактором с циркулирующим топливом. Кинетика реактора в приближении одноточечной модели и среднего времени жизни нейтронов может быть описана уравнениями

$$dP/dt = [\rho(t)/\tau(t)] P(t); \quad (1)$$

$$\rho(t) = \rho_0(t) + r_1 \delta T_1(t) + r_2 \delta T_2(t) + \\ + \delta \gamma(t) + \delta \omega(t). \quad (2)$$

Здесь  $P(t)$  — тепловая мощность реактора;  $\delta T_1(t)$  — изменение средней температуры соли

в реакторе;  $\rho_0(t)$  — реактивность, вносимая стержнями регулирования;  $r_1, r_2$  — температурные коэффициенты реактивности для топливной соли и замедлителя соответственно;  $\delta_\omega(t)$  — изменение реактивности, связанное с изменением концентрации ксенона в активной зоне реактора;  $\delta_U(t)$  — изменение реактивности, вызываемое изменением эффективной доли запаздывающих нейтронов  $\beta_{\text{eff}}$  в системе при изменении расхода циркулирующего топлива;  $\tau(t)$  — среднее время жизни нейтронов в реакторе, зависимость от времени которого связана с изменением  $\beta_{\text{eff}}$  в процессе регулирования ( $\beta_{\text{eff}}$  и  $\delta_U(t)$  для точечной модели реактора с циркулирующим топливом вычисляются по формулам, приведенным в работе [2]).

Средняя температура замедлителя  $T_2(t)$  меняется с мощностью реактора вследствие изменений температуры топливной соли и энерговыделения в графите замедлителя. Изменение температуры замедлителя  $\delta T_2(t)$  определяется путем усреднения по объему активной зоны поля температур в замедлителе. Последнее находится в результате решения нестационарного уравнения теплопроводности для графитового стержня с эквивалентным сечением, омываемого потоком топливной соли, текущий вдоль оси активной зоны между графитовыми стержнями. Изменение реактивности  $\delta_\omega(t)$ , связанное с отравлением реактора ксеноном, вычисляется методом, изложенным ниже.

Перечисленные режимы изменения мощности могут быть условно разделены на две группы: «медленное» изменение мощности по сравнению с временем разогрева графитового замедлителя и «быстро» изменение мощности за время, существенно меньшее времени разогрева замедлителя. Характерное время запаздывания изменения температуры в графитовых стержнях по отношению к моменту изменения энерговыделения в них составляет  $\sim 20$  с. По отношению к этому времени к первой группе режимов относятся режимы ежесуточного и еженедельного останова реактора (режим I) и режим изменения мощности в регулировочном диапазоне (режим II), для которых время изменения мощности составляет от 2 ч до 15 мин. Ко второй группе относятся режим быстрого изменения мощности на  $\pm 10\%$  (режим III).

**Медленное изменение мощности ЖСР.** Пусть мощность ЖСР меняется линейно со временем, т. е.

$$p(t) = p_1(1 + \varepsilon t), \quad (3)$$

где  $p(t) = P(t)/P_0$ ;  $P_0$  — номинальная мощность реактора;  $p_1 = P(0)/P_0$ ;  $\varepsilon = \text{const}$ .

Будем изменять расход топливной соли  $G(t)$ , циркулирующей через реактор, таким образом, чтобы

$$g(t) = G(t)/G_0 = p(t), \quad (4)$$

где  $G_0$  — расход топливной соли при номинальной мощности  $P_0$ .

Можно показать, что при таком изменении мощности  $P(t)$  и расхода топлива  $G(t)$  с сохранением неизменной температуры топливной соли на входе в реактор будет обеспечено постоянство поля температур в топливной соли внутри реактора, так что

$$\delta T_1(t) = 0. \quad (5)$$

Режим изменения мощности по закону (4) может быть осуществлен соответствующим изменением реактивности  $\rho_0(t)$ . При этом в процессе регулирования обеспечивается отсутствие температурных напряжений в элементах конструкции корпуса реактора и контура циркуляции топливной соли. Исключение составляют только графитовые стержни, в которых при изменении мощности реактора меняется поле температур. Однако, как следует из оценок, приведенных ниже, возникающие при этом термические напряжения в графитовых стержнях оказываются небольшими по сравнению с предельно допустимыми напряжениями в графите.

Из уравнений (1)–(3) и (5) получаем закон изменения  $\rho_0(t)$ :

$$\begin{aligned} \rho_0(t) = & [\varepsilon t(t)/(1 + \varepsilon t)] - r_2 \delta T_2(t) - \\ & - \delta_U(t) - \delta_\omega(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Ниже приведены принятые при расчете параметры ЖСР-1000 и основные характеристики двух режимов изменения мощности:

	Режим	
	I	II
Время изменения мощности .	1 ч;	15 мин
Диапазон изменения мощности, % .	3,5–100;	30–100
Средняя скорость изменения мощности и расхода топлива, %/мин .	1,58;	4,7
Максимальное изменение реактивности в процессе регулирования .	$0,325 \cdot 10^{-3}$ ;	$0,85 \cdot 10^{-3}$
Максимальная реактивность, вносимая стержнями регулирования .	$0,815 \cdot 10^{-3}$ ;	$0,2 \cdot 10^{-3}$
Номинальная тепловая мощность, МВт .	2250	
Подогрев топливной соли в активной зоне $\Delta T_2$ , °C .		138
Температурный коэффициент реактивности $\Delta k/k$ , 1/°C:		
топливной соли .	$-3,3 \cdot 10^{-5}$	
замедлителя .		$2,4 \cdot 10^{-4}$

Эффективная доля запаздывающих нейтронов при номинальной мощности $\beta_{\text{eff}}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$
Среднее время жизни нейтронов при номинальной мощности $t_s$ , с	0,03

Для режима I выбрана минимальная мощность  $0,035 P_0$ , на которой реактор работает в ночное время. Такая мощность реактора используется на собственные нужды [3], и реактор вочные часы находится в «горячем» режиме, полностью обеспечивая потребность в энергии на циркуляцию топлива, его переработку и работу систем регулирования и контроля. На рис. 1 показано изменение в процессе регулирования относительной мощности реактора  $P(t)$ , относительного расхода топливной соли  $g(t)$ , полной реактивности  $r(t)$  и ее отдельных составляющих для режима I. Как видно из рис. 1 и данных, приведенных выше, рассматриваемые режимы изменения мощности могут быть осуществлены на ЖСР достаточно просто. Изменение реактивности в процессе регулирования не превышает  $0,0325\%$ , что в 6 раз меньше  $\beta_{\text{eff}}$ . Реактивность, вносимая стержнями регулирования, не превышает  $0,082\%$ . При таком небольшом изменении реактивности отсутствуют существенные перекосы энергораспределения в активной зоне реактора.

**Быстрое изменение мощности ЖСР.** При изменении мощности реактора на  $\pm 10\%$  примерно за 5 с температура замедлителя практически не успевает измениться, а из-за малой амплитуды изменения мощности  $\beta_{\text{eff}}$  и концентрация кисенона остаются практически постоянными. В этом случае можно обеспечить нужный режим изменения мощности реактора путем изменения расхода циркулирующего топлива благодаря наличию отрицательной обратной связи по температуре топливной соли:

$$\rho(t) = r_1 \delta T_1(t). \quad (7)$$

Уравнение для  $\delta T_1(t)$  легко получить из баланса мощности в реакторе:

$$P(t) = cG(t) \left[ \Delta T_0 + \alpha \delta T_1(t) + \frac{H}{v(t)} \frac{\partial T_1(t)}{\partial t} \right], \quad (8)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость топливной соли;  $\Delta T_0$  — подогрев топливной соли в активной зоне при номинальном режиме мощности  $P_0$ ;  $H$  — высота активной зоны;  $v(t)$  — скорость циркуляции топливной соли через активную зону;  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности между изменением средней температуры соли и изменением подогрева.

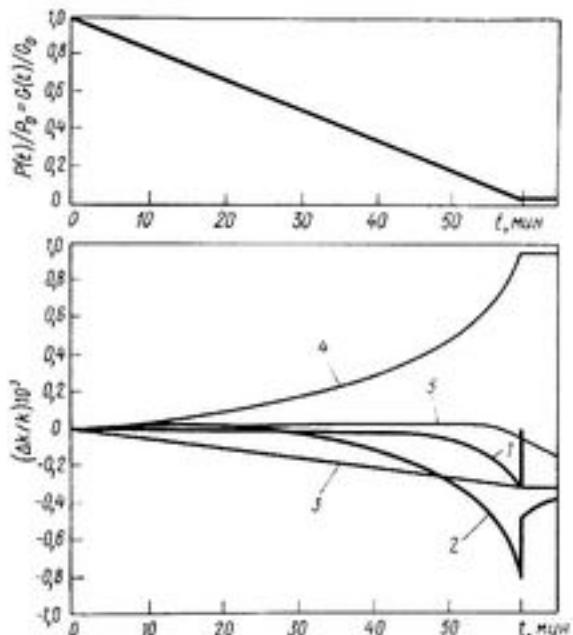


Рис. 1. Изменение мощности  $P(t)$ , расхода циркулирующего топлива  $G(t)$  и реактивности ЖСР в процессе регулирования при уменьшении его мощности (режим I):  
 1 —  $\rho(t)$  — полная реактивность; 2 —  $r_1(t)$  — реактивность, вносимая стержнями регулирования; 3 —  $r_2 \delta T_2(t)$  — реактивность, связанный с изменением температуры замедлителя; 4 —  $r_3 \delta T_3(t)$  — реактивность, связанный с изменением эффективной доли запаздывающих нейтронов; 5 —  $\beta_{\text{eff}}(t)$  — реактивность, связанный с изменением концентрации кисенона

Подставляя (7) в (1) и используя (8) [пренебрегая членом  $\frac{H}{v(t)} \frac{\partial T_1(t)}{\partial t}$  по сравнению с  $\Delta T_0$ ], получаем уравнение динамики реактора в виде

$$\frac{dP(t)}{dt} + \frac{(r_1/\alpha) \Delta T_0}{\tau} P(t) - \frac{(r_1/\alpha) \Delta T_0}{\tau} \frac{P^2(t)}{g(t)} = 0, \quad (9)$$

где  $P(t)$  и  $g(t)$  определяются формулами (3) и (4), а  $\tau$  — среднее время жизни нейтронов при номинальной мощности.

Пусть расход топливной соли меняется по закону

$$g(t) = g_1 (1 + \varepsilon_0 t), \quad (10)$$

где  $\varepsilon_0 = 0,01 \text{ } 1/\text{C}$ ;  $g_1 = g(0)$ .

Изменение мощности реактора  $P(t)$  и температуры топливной соли  $\delta T_1(t)$  для этого случая показано на рис. 2, из которого видно, что реактор выходит на новую мощность за 6 с, а максимальное изменение температуры топливной соли не превышает  $10^\circ\text{C}$ . После окончания переходного процесса поле температур в топливной соли восстанавливается. Изменение реактивности, связанное с последующим изменением температуры замедлителя, может

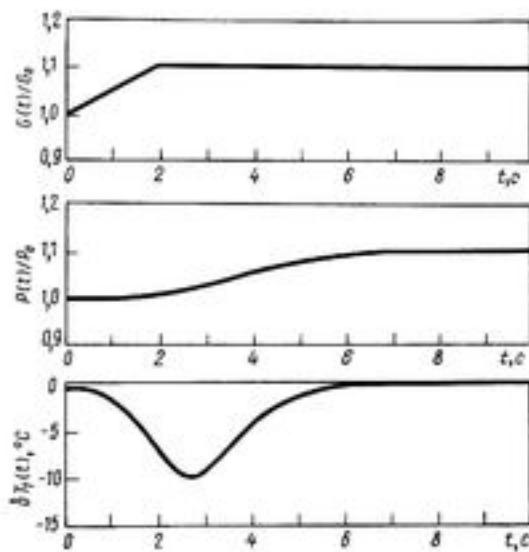


Рис. 2. Изменение расхода циркулирующего топлива  $G(t)$ , мощности  $P(t)$  и температуры топливной соли  $\delta T_f(t)$  со временем в ЖСР при быстром изменении мощности

быть скомпенсировано стержнями регулирования.

Таким образом, рассматриваемый способ регулирования реактора не приводит к существенному изменению температуры топливной соли. При этом, по-видимому, массивные элементы конструкции, такие, как корпус реактора и теплообменник, за время изменения температуры соли (6 с) практически не успевают изменить свою температуру, так что никаких дополнительных термоупругих напряжений в них не возникнет.

#### Ксеноновое отравление при уменьшении мощности реактора

В жидкостном реакторе с циркулирующим топливом предусмотрена непрерывная очистка топливной соли от газообразных продуктов деления (в том числе от  $^{133}\text{Xe}$ ). Опыт работы на экспериментальном реакторе MSRE показал, что продувка гелием рабочей полости топливного насоса приводит к уменьшению равновесной концентрации ксенона в соли примерно на порядок.

В ЖСР топливная соль первого контура насыщается пузырьками гелия, объемная доля которых, принятая в проекте MSBR-1000, составляет 0,5% [4]. Ксенон, образующийся при делении урана, попадает в эти газовые пузырьки в процессе диффузии. Период выведения

ксенона в газовые пузырьки составляет 20 с. При номинальной мощности ЖСР пузырьки газа, содержащие ксенон, удаляются из топливной соли в байпасном контуре, где установлен газовый сепаратор. В байпасный контур отводится 10% потока топливной соли, из которой газ полностью удаляется в систему отвода.

При снижении мощности реактора в процессе его ежесуточного останова расход топливной соли уменьшается пропорционально мощности реактора. При этом расход соли через байпасный контур, где газ сепарируется от соли, остается постоянным вплоть до мощности  $P(t_0) = 0,1 P_0$ . При дальнейшем уменьшении мощности расход соли через сепаратор начинает уменьшаться пропорционально мощности.

Ксенон, растворенный в топливной соли, может диффундировать в графитовые стержни замедлителя. Однако если эти стержни изготовлены из достаточно плотного графита, например стеклографита, имеющего коэффициент диффузии для газов  $10^{-12} \text{ см}^2/\text{s}$ , или облицованы металлическим покрытием, то проникновение ксенона в графит может быть снижено до такого уровня, при котором основной вклад в отравление реактора будет давать ксенон, находящийся в топливной соли и газовых пузырьках.

На основе описанной выше модели поведения ксенона был проведен расчет ксенонового отравления в процессе уменьшения мощности реактора от 100 до 3,5% номинальной мощности за 1 ч (режим I) и дальнейшей работы реактора с постоянной мощностью  $P_{\min} = 0,035 P_0$ . Ниже приведены параметры ксенонового отравления реакторов ВВЭР-1000 и ЖСР-1000:

Равновесная концентрация $^{131}\text{I}$ , $\text{см}^{-3}$	6,75 · 10 <sup>13</sup>	2,53 · 10 <sup>13</sup>
Равновесная концентрация $^{133}\text{Xe}$ , $\text{см}^{-3}$	1,75 · 10 <sup>13</sup>	0,841 · 10 <sup>13</sup>
Равновесное ксеноновое отравление, %	-2,73	-1,8 · 10 <sup>-2</sup>
Максимальное ксеноновое отравление при снижении мощности до 0,035 $P_0$ , %	-5,70	-3,22 · 10 <sup>-2</sup>

Результаты расчетов представлены на рис. 3. Для сравнения приведены результаты расчета ксенонового отравления реактора ВВЭР-1000 для аналогичного режима изменения мощности. Из рис. 3 видно, что максимальное изменение реактивности вследствие ксенонового отравления ЖСР достигается через 15 мин после вывода реактора на минимальную мощность  $P_{\min}$  и составляет  $\delta w_{\max} = -1,42 \cdot 10^{-4}$ . Эта реактивность в 10 раз меньше эффективной доли западывающих нейтронов в ЖСР. Для ВВЭР-1000 максимальное отравление достигается пример-

но через 9 ч после вывода на мощность  $P_{\text{мин}}$  и составляет  $\delta w_{\text{ макс}} = -3 \cdot 10^{-2}$ . В ЖСР через 6 ч после вывода его на мощность  $P_{\text{мин}}$  концентрация ксенона уменьшается до равновесного значения на номинальной мощности, а затем продолжает убывать.

Таким образом, выведение ксенона из топливной соли ЖСР со скоростью, предусмотренной в проекте MSBR, практически полностью снимает проблему отравления реактора после его останова.

### Температурные напряжения в графитовом замедлителе

При изменении мощности реактора в графитовом замедлителе изменяется тепловыделение и вследствие этого меняется поле температур. Кроме того, в результате радиационных повреждений под действием нейтронов происходит деформация графита. Так как плотность тепловыделения в графите приблизительно в 10 раз меньше, чем в топливной соли, то разность между максимальной температурой внутри графитового стержня и температурой на его поверхности невелика и составляет  $\sim 50^{\circ}\text{C}$ . С учетом дополнительной деформации, обусловленной радиационными эффектами, это вызывает в стержнях напряжения, не превышающие  $\sigma_{\text{макс}} = -35 \text{ кгс}/\text{см}^2$  [4] при работе реактора на номинальной мощности. При работе реактора в режиме переменной мощности термоупругие напряжения в графите периодически уменьшаются при снижении мощности реактора. При этом амплитуда изменения напряжений не превышает  $\sigma_{\text{макс}}$ . Предельно допустимые напряжения на разрыв для рассматриваемого в работе [4] сорта графита составляют  $\sigma_{\text{пр}} = 350 \text{ кгс}/\text{см}^2$ , что указывает на десятикратный запас прочности. Поэтому нет оснований опасаться, что термоциклические напряжения в графите при периодическом изменении мощности реактора приведут к преждевременному разрушению графитовых стержней.

Исследование особенностей работы ЖСР с циркулирующим топливом в режиме переменных нагрузок показало следующее:

1. Изменение мощности реактора как при его ежесуточных и еженедельных остановах, так и в регулировочном диапазоне может быть обеспечено путем изменения расхода циркулирующего топлива с одновременным регулированием поглощающими стержнями таким образом, чтобы поле температур в топливной соли оставалось постоянным в процессе регулирования. Такой

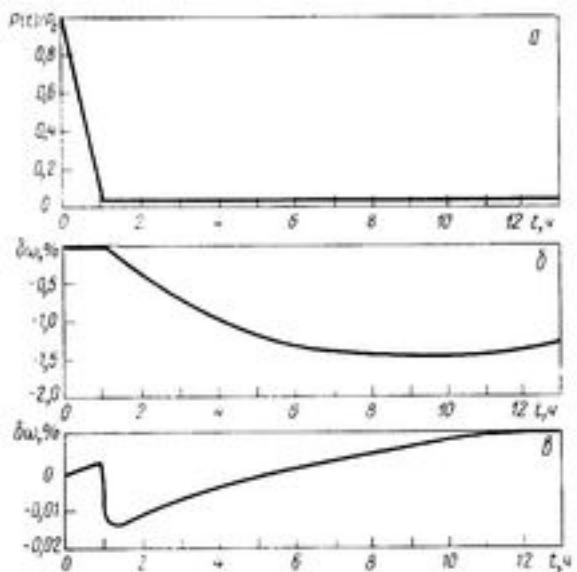


Рис. 3. Изменение мощности реактора  $P$  (a) ( $\text{W}/\text{cm}^3$ ) и реактивности  $\delta$  (b), связанной с изменением концентрации ксенона при уменьшении его мощности (режим 1) для ВВЭР-1000 (c) и ЖСР-1000 (d)

способ регулирования сводит к минимуму перекосы энергораспределения в активной зоне реактора и исключает термоциклические нагрузки на радиус реактора и элементы конструкции контура теплоносителя.

2. Регулирование ЖСР изменением расхода циркулирующего топлива обеспечивает изменение его мощности в пределах  $\pm 10\%$  за время, не превышающее 6 с.

3. Непрерывное выведение  $^{133}\text{Xe}$  из топливной соли ЖСР исключает сколько-нибудь существенное отравление при останове реактора.

4. Максимальные термические напряжения в графитовых стержнях замедлителя на порядок меньше предела прочности графита. Такой запас прочности позволяет считать, что опасность термоциклических разрушений графитовых стержней в ЖСР будет минимальна.

5. Возможность работы ЖСР с температурой теплоносителя  $700-900^{\circ}\text{C}$  позволяет использовать газотурбинный преобразователь электроэнергии, для которого значительно легче осуществляются режимы изменения мощности, чем для паротурбогенератора.

Таким образом, физические особенности ЖСР существенно облегчают проблемы, возникающие в современных твердотопливных реакторах при их работе с переменной мощностью.

Поступила в Редакцию 1.IX.77