

УДК 621.039.311.2:621.039.516:621.039.516.232

## Физические аспекты использования жидкосолевых реакторов для покрытия переменных нагрузок

СУББОТИН В. И., БЛИНКИН В. Л., НОВИКОВ В. М., ШКУРПЕЛОВ 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 термодинамические 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 (ЖСР). Действительно, в таком реакторе топливо находится в составе расплавленных солей и проблема термодинамических 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 осуществлять 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 турбины. 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

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

$$\begin{aligned} \rho(t) = \rho_0(t) + r_1 \delta T_1(t) + r_2 \delta T_2(t) + \\ + \delta \gamma(t) + \delta \omega(t). \end{aligned} \quad (2)$$

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;  $\delta\gamma(t)$  — изменение реактивности, вызываемое изменением эффективной доли запаздывающих нейтронов  $\beta_{эф}$  в системе при изменении расхода циркулирующего топлива;  $\tau(t)$  — среднее время жизни нейтронов в реакторе, зависимость от времени которого связана с изменением  $\beta_{эф}$  в процессе регулирования ( $\beta_{эф}$  и  $\delta\gamma(t)$  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, текущей 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 «быстрое» 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 относится 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

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

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  $\rho_0(t)$ :

$$\rho_0(t) = [\varepsilon\tau(t)/(1 + \varepsilon t)] - r_2\delta T_2(t) - \delta\gamma(t) - \delta\omega(t). \quad (6)$$

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            | $0,325 \cdot 10^{-3}$ ; | $0,85 \cdot 10^{-4}$ |
| 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 $\Delta T_0, ^\circ\text{C}$    | 138                     |                      |
| Температурный коэффициент реактивности $\Delta k/k, 1/^\circ\text{C}$ : |                         |                      |
| топливной соли  | $-3,3 \cdot 10^{-5}$    |                      |
| замедлителя   | $2,4 \cdot 10^{-5}$     |                      |

Эффективная доля запаздывающих нейтронов при номинальной мощности  $\beta_{эф}$  . . . . .  $1,82 \cdot 10^{-3}$   
 Среднее время жизни нейтронов при номинальной мощности  $\tau$ , 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 в ночные 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  $\rho(t)$  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  $\beta_{эф}$ . 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  $\beta_{эф}$  и концентрация ксенона 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.

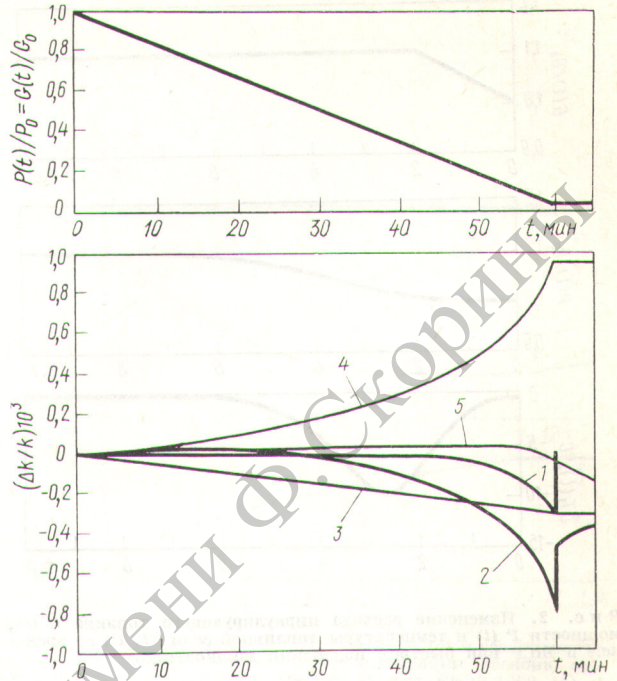


Рис. 1. Изменение мощности  $P(t)$ , расхода циркулирующего топлива  $G(t)$  и реактивности ЖСР в процессе регулирования при уменьшении его мощности (режим I): 1 —  $\rho(t)$  — полная реактивность; 2 —  $\rho_0(t)$  — реактивность, вносимая стержнями регулирования; 3 —  $r_2 \delta T_2(t)$  — реактивность, связанная с изменением температуры замедлителя; 4 —  $\delta \gamma(t)$  — реактивность, связанная с изменением эффективной доли запаздывающих нейтронов; 5 —  $\delta \omega(t)$  — реактивность, связанная с изменением концентрации ксенона

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  $\frac{dP(t)}{dt} + \frac{(r_1/\alpha) \Delta T_0}{\tau} P(t) - \frac{(r_1/\alpha) \Delta T_0}{\tau} \frac{p^2(t)}{g(t)} = 0$ , (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  $\varepsilon_0 = 0,01 \text{ 1}^\circ\text{C}$ ;  $g_1 = g(0)$ .

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

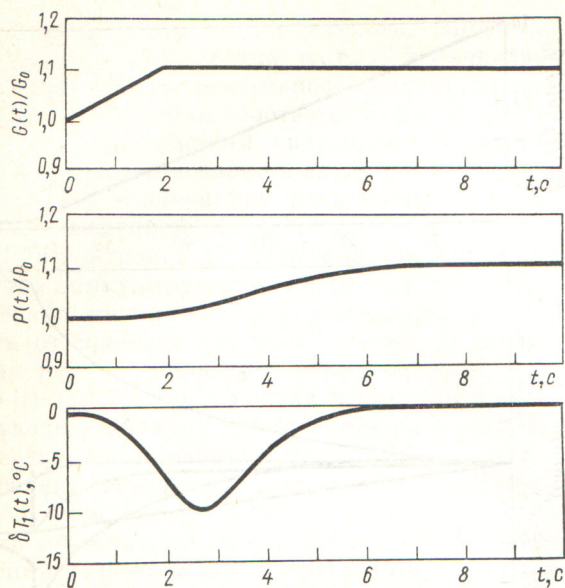


Рис. 2. Изменение расхода циркулирующего топлива  $G(t)$ , мощности  $P(t)$  и температуры топливной соли  $\delta T_1(t)$  со временем в ЖСР при быстром изменении мощности

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 жидкосольевом реакторе с циркулирующим топливом предусмотрена непрерывная очистка топливной соли от газообразных продуктов деления (в том числе от  $^{135}\text{Xe}$ ). 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  $10^{-12}$  см<sup>2</sup>/с, 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  $P_{\text{мин}} = 0,035 P_0$ . Ниже приведены параметры ксенонового отравления реакторов ВВЭР-1000 и ЖСР-1000:

|   |                           |                          |
|---|---------------------------|--------------------------|
| Равновесная концентрация $^{135}\text{I}$ , см <sup>-3</sup> . . . . .                | 6,75 · 10 <sup>15</sup> ; | 2,53 · 10 <sup>15</sup>  |
| Равновесная концентрация $^{135}\text{Xe}$ , см <sup>-3</sup> . . . . .               | 1,75 · 10 <sup>15</sup> ; | 0,841 · 10 <sup>15</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  $P_{\text{мин}}$  и составляет  $\delta w_{\text{макс}} = -1,42 \cdot 10^{-4}$ . Эта реактивность в 10 раз меньше эффективной доли запаздывающих нейтронов в ЖСР. Для ВВЭР-1000 максимальное отравление достигается пример-

но через 9 ч после вывода на мощность  $P_{\min}$  и составляет  $\delta w_{\max} = -3 \cdot 10^{-2}$ . В ЖСР через 6 ч после вывода его на мощность  $P_{\min}$  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  $\sigma_{\max} = 35 \text{ кгс/см}^2$  [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  $\sigma_{\max}$ . Предельно допустимые напряжения на разрыв для рассматриваемого в работе [4] сорта графита составляют  $\sigma_{\text{пр}} = 350 \text{ кгс/см}^2$ , 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

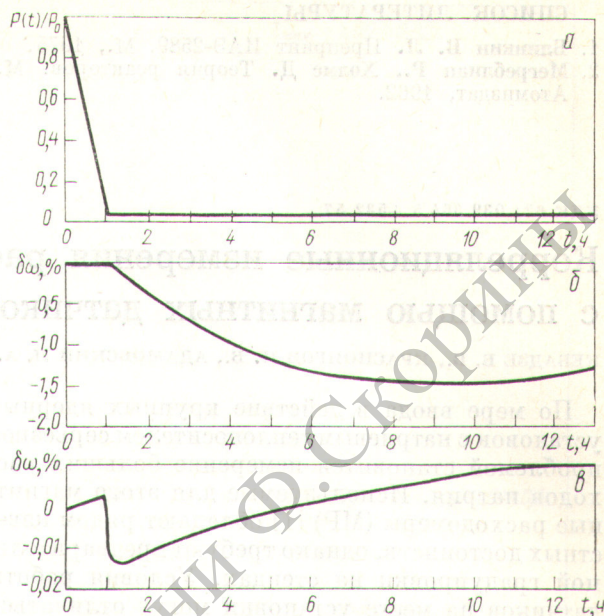


Рис. 3. Изменение мощности реактора  $P(t)$  (а) и реактивности  $\delta w(t)$ , связанной с изменением концентрации ксенона при уменьшении его мощности (режим 1) для ВВЭР-1000 (б) и ЖСР-1000 (в)

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  $^{135}\text{Xe}$  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  $700\text{--}900^\circ\text{C}$  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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинкин В. Л. Препринт ИАЭ-2589. М., 1975.
2. Мегреблиан Р., Холмс Д. Теория реакторов. М., Атомиздат, 1962.

3. Bettis E., Robertson R. «Nucl. Appl Technol.», 1970, v. 8, p. 190.
4. Scott D., Eatherly W. Ibid., p. 179.

УДК 621.039.564.5.+532.57

## Корреляционные измерения расхода натрия с помощью магнитных датчиков

КЕБАДЗЕ Б. В., КРАСНОЯРОВ Н. В., АДАМОВСКИЙ Л. А., ГОЛУШКО В. В., СРОЕЛОВ В. С.

По мере ввода в действие крупных ядерных установок с натриевым теплоносителем серьезной проблемой становится измерение больших расходов натрия. Используемые для этого магнитные расходомеры (МР) [1] обладают рядом известных достоинств, однако требуют предварительной градуировки на стендах. Условия работы датчиков на месте установки могут отличаться от стендовых по степени искажения профиля скорости за счет источников гидродинамических возмущений, по контактным сопротивлениям, электропроводности теплоносителя и т. п. Возможны также изменения характеристик магнитной системы. Поэтому трудно гарантировать измерение расхода в контуре с точностью, которая обеспечивается градуировкой на стенде. На АЭС с быстрым реактором PFR (Великобритания) предполагается градуировать МР на трубопроводах большого диаметра с помощью корреляции случайных сигналов термопар [2]. Недостатки такого метода состоят в необходимости введения термопар в поток натрия, в ограниченности срока службы термопар и их инерционности, что ухудшает точность измерений.

Был использован корреляционный метод измерения расхода натрия с помощью магнитных датчиков на БОР-60 ( $D_1$  и  $D_2$ ) [1] и натриевых стендах в широком диапазоне расходов при различных конфигурациях измерительных участков. Рассмотрим в качестве примера результаты измерений на одной из петель БОР-60. Для корреляций использовали флюктуации сигналов двух штатных расходомеров, расположенных последовательно по потоку на прямолинейном участке трубопровода (рис. 1). Статистические характеристики флюктуаций после усиления и фильтрации определяли с помощью коррелографа. Длительность измерения составляла 15—20 мин. Обнаружено, что функция взаимной корреляции (ВКФ) сигналов содержит сдвиг

нутый по времени максимум, причем величина сдвига  $\tau$  соответствует времени прохождения натрия расстоянию между электродами датчиков, рассчитанному по известному расходу с учетом геометрии измерительного участка. Коэффициент корреляции пролетной составляющей равен  $\sim 0,3$ . Погрешность измерения временного сдвига ( $\pm 2\%$ ) зависела от аппаратуры. Время прохождения натрия, рассчитанное по показаниям каждого датчика одной петли, различается вследствие разброса их показаний; погрешность расчета ( $\pm 5\%$ ) определяется неточностью стендовой градуировки расходомеров.

Результаты сопоставления расходов, измеренных по градуировочным характеристикам МР и рассчитанных по корреляционному сдвигу (см. таблицу), согласуются в пределах указанных погрешностей. Хорошая воспроизводимость корреляционного пика при различных состояниях установки свидетельствует о наличии в потоке устойчивых локальных образований, которые при перемещении с потоком через два последовательно установленных расходомера вызывают поочередные микропульсации в их показаниях — появляются смещенные максимумы ВКФ. Наблюдаемая пролетная составляющая, по-видимому, не связана с температурными пульсациями, поскольку изменения температурного режима практически не влияют на вид ВКФ. Предполагалось также, что корреляционный пик образуется из-за пузырьков аргона, который может захватываться из газовой полости в верхней части теплообменника. Однако сопоставление корреляций до и после сдвиги аргона не выявило каких-либо различий. Вероятным источником наблюдаемого эффекта являются гидродинамические неоднородности потока типа вихрей. Для уточнения природы пролетной компоненты были проведены эксперименты на натриевом стенде.