

БОРНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Н.Н. Алексеев

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5031

Большие кампании активных зон энергетических реакторов требуют больших начальных запасов реактивности ($15 - 22 \beta_3$), а, значит, и больших количеств поглотителей для их компенсации. Но перемещения в активной зоне «тяжёлых» поглотителей может вызывать сильное искажение нейтронного поля в реакторе, увеличивая неравномерность распределения $\Phi(r, H)$ и тем самым снижая экономические показатели работы энергоблока. Более того, в некоторых случаях перекосы нейтронного поля могут быть опасными, поскольку они приводят к возникновению неустойчивости нейтронного поля в реакторе.

Что же делать в таком случае? – Первая закономерно возникающая мысль: необходимо сделать так, чтобы введение поглотителя в активную зону было равномерным по всему объёму активной зоны. Эта идея и реализована в борном регулировании: жидкий поглотитель (борная кислота H_3BO_3) вводится в теплоноситель (воду) первого контура, и так как теплоноситель непрерывно циркулирует через активную зону реактора, в последней в любой момент времени будет содержаться строго определённое количество бора, равное произведению концентрации борной кислоты в теплоносителе на величину объёма, занимаемого теплоносителем в активной зоне. Следовательно, если величина концентрации борной кислоты в воде первого контура постоянна, то содержащаяся в объёме активной зоны борная кислота компенсирует определённую постоянную величину запаса реактивности, а если концентрация борной кислоты в первом контуре будет изменяться, то будет изменяться и скомпенсированный запас реактивности реактора. В этом – первичный смысл борного регулирования.

Таким образом, в начале кампании, создавая достаточно высокую концентрацию борной кислоты в воде, добиваются компенсации большей части начального общего запаса реактивности, оставляя на долю оперативного запаса небольшую величину, необходимую для обеспечения маневрирования реактора, и не превышающую величины $0.6 - 0.8 \beta_3$, обеспечивающей исключение возникновения ядерноопасных ситуаций даже при ошибках операторов, связанных в высвобождением больших положительных реактивностей при перемещениях подвижных поглотителей в активной зоне.

Борное регулирование (в отличие от регулирования реактора с помощью подвижных поглотителей) при любых предусмотренных изменениях концентрации борной кислоты практически не изменяет формы поля тепловых нейтронов в активной зоне.

Поскольку первый контур АЭУ реакторов типа ВВЭР, к сожалению, не герметичен (существуют так называемые контролируемые протечки из циркуляционных насосов первого контура), вместе с протечками теплоносителя из первого контура непрерывно медленно исчезает и жидкий поглотитель. Для

восполнения утечек борной кислоты из первого контура и для изменения её концентрации с целью обеспечения заданной безопасной величины оперативного запаса реактивности в составе реакторной установки с ВВЭР предусматривается система борного регулирования. Она состоит из насосов борного регулирования, ёмкостей для приготовления и хранения растворов борной кислоты и соединительных трубопроводов.

В обычном режиме система борного регулирования собрана таким образом, что производя забор раствора из рабочей ёмкости с концентрацией, равной концентрации борной кислоты в первом контуре, насосы борного регулирования подают этот раствор на всас штатных насосов системы подпитки первого контура, восполняя утечки из контура и воды и борной кислоты и, тем самым, поддерживая величину концентрации борной кислоты в воде первого контура постоянной.

При необходимости уменьшения величины оперативного запаса реактивности реактора система борного регулирования работает по той же схеме, исключая только то, что забор раствора берётся насосами не из ёмкости с текущим значением концентрации борной кислоты, а из ёмкости с концентрацией её, равной 40 г/кг (считается, что раствор с $C_k = 40$ г/кг – концентрированный раствор борной кислоты), в которой этот раствор подготовлен заранее.

При необходимости повышения величины оперативного запаса реактивности подпитка первого контура ведётся уже не раствором борной кислоты, а чистым дистиллятом, тем самым, изменяя обычный баланс между утечкой борной кислоты (вместе с протечками первого контура) и её восполнением (от системы борного регулирования). Проще говоря, подпиткой первого контура чистой водой добиваются снижения концентрации кислоты в контуре путём разбавления раствора в нём чистой водой.

Таким образом, главными достоинствами борного регулирования, обусловившими применение этого способа регулирования в отечественных ВВЭР, являются:

- «мягкость» регулирования, то есть неизменность при регулировании формы нейтронного поля в активной зоне реактора;
- возможность поддержания текущей величины оперативного запаса реактивности реактора в требуемых безопасных пределах, исключая возникновение режимов неуправляемого разгона реактора вследствие высвобождения больших положительных реактивностей при случайных ошибочных действиях оперативного персонала.

Характер изменения концентрации борной кислоты в первом контуре при водообмене

Уравнение баланса количества кислоты в первом контуре:

$$\gamma \cdot V \frac{dc}{dt} = C_{п} \cdot G_{п} - C(t) \cdot G_{у}, \quad (1)$$

$C_{п}$, г/кг – концентрация борной кислоты в баке борного регулирования;

$G_{п}$, кг/с – массовый расход, обеспечиваемый системой подпитки I контура;

$G_{у}$, кг/с – расход утечек (дренажа) первого контура.

Здесь первое слагаемое правой части (1) – скорость увеличения массы борной кислоты в первом контуре, приходящей из системы борного регулирования через систему подпитки, а второе – скорость убыли массы борной кислоты из I контура за счёт утечек из первого контура.

В стационарном режиме работы I контура, когда расход утечек в точности восполняется расходом подпитки I контура ($G_{\text{п}} = G_{\text{у}}$), а именно этот режим строго соблюдается на практике (иначе в контуре давление теплоносителя либо растёт при $G_{\text{п}} < G_{\text{у}}$, либо падает при $G_{\text{п}} > G_{\text{у}}$), и поэтому уравнение (1) с учётом этого условия будет:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{G_{\text{п}}}{\gamma \cdot V} [C(t) - C_{\text{п}}]. \quad (2)$$

Если в некоторый момент времени $t = 0$, принимаемый за момент начала отсчёта переходного процесса, величина концентрации борной кислоты в контуре была C_0 , то решение уравнения (2) при таком начальном условии будет:

$$C(t) = C_{\text{п}} - (C_{\text{п}} - C_0) \exp\left(-\frac{G_{\text{п}}}{\gamma \cdot V} t\right). \quad (3)$$

то есть изменение концентрации борной кислоты в I контуре в самом общем случае водообмена происходит во времени по экспоненциальному закону.

Для практика интересны два частных случая характера изменения концентрации борной кислоты, а именно:

а) Если начальное значение концентрации $C_0 = 0$ (что бывает при первом вводе борной кислоты в воду первого контура), то:

$$C(t) = C_{\text{п}} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_{\text{п}}}{\gamma \cdot V} t\right)\right). \quad (4)$$

т.е. концентрация борной кислоты растёт по экспоненциальному закону, причем для каждой отдельно взятой АЭУ нарастание концентрации зависит от концентрации борной кислоты в баке борного регулирования, а также производительностью насосов.

Чем больше подача подпиточных средств, тем выше темп нарастания концентрации борной кислоты в воде I контура. Чем выше концентрация борной кислоты в подпиточной воде, тем выше скорость роста концентрации кислоты в I контуре. Характер роста концентрации кислоты в контуре показан на рис.2.

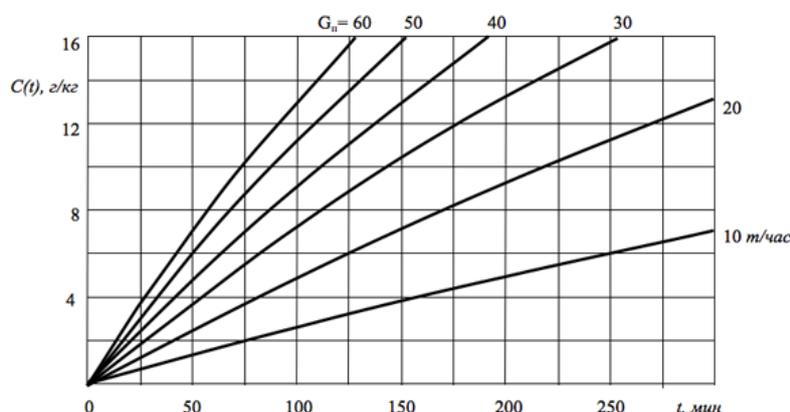


Рис. 2. Рост концентрации борной кислоты при первичном вводе её в первый контур.

б) Случай, когда $C_{п} = 0$ (то есть при разбавлении теплоносителя I контура чистым дистиллатом):

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{G_{п}}{\gamma \cdot V} t\right). \quad (5)$$

Как видим, и в этом случае (рис.3) падение величины концентрации борной кислоты в воде I контура происходит по экспоненциальному закону, задаваемому в конкретной АЭУ только производительностью подпиточных средств (равной расходу протечек первого контура).

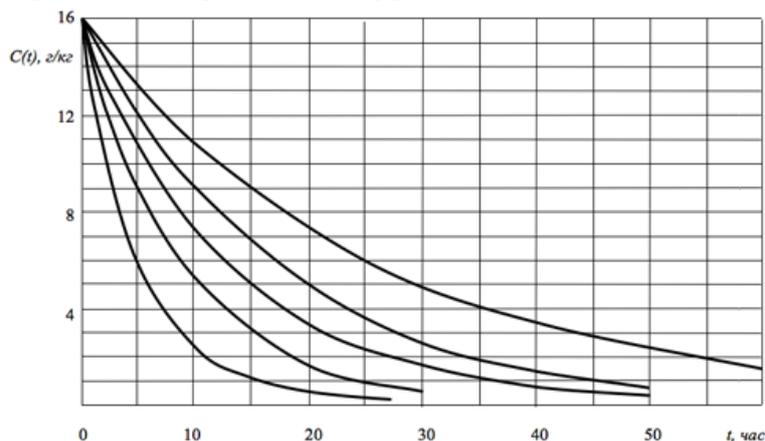


Рис. 3. Снижение концентрации борной кислоты в реакторе ВВЭР-1000 при расходах подпитки первого контура чистым дистиллатом (сверху вниз) – 10, 15, 20, 30, 50 т/час.

Похожие графики входят в рабочую документацию операторов РУ, и с помощью них решают следующие задачи:

1. по первичным данным концентрации борной кислоты C_1 и массового расхода $G_{п}$ можно рассчитать концентрацию борной кислоты $C(t)$ через время t с начала работы подпитки;
2. по начальным и конечным концентрациям борной кислоты в первом контуре определить время работы подпитки с определенным расходом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Инструкция по эксплуатации узла реагентов РЦ-5 №5.2.УР.ТБ.ИЭ
2. Инструкция по эксплуатации системы подпитки-продувки и организованных протечек №5.2.ПН.ПР.ИЭ