

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ РАБОТЕ ВВЭР-1000 И ВВЭР-1200 В РЕЖИМЕ СЛЕДОВАНИЯ ЗА НАГРУЗКОЙ

© 2020 г. Б. Джарум^{1,*}, Д. А. Соловьёв¹, А. А. Семенов¹, Н. В. Шукин¹, С. Б. Выговский¹,
А. И. Аль-Шамайлах¹, Х. А. Танаши¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

*e-mail: bel.djar111215@gmail.com; vulture@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.06.2020 г.

После доработки 26.06.2020 г.

Принята к публикации 08.09.2020 г.

Для регулирования нагрузки энергосистемы широко применяются существующие тепловые электростанции, а действующие АЭС используются в основном в базовом режиме. Однако в настоящее время системы электроснабжения требуют регулирования выработки ядерной электроэнергии. В этой связи актуальной становится задача адаптации АЭС к новым специфическим условиям работы в переменном режиме. Для решения этой задачи предлагается разработка усовершенствованных алгоритмов, предназначенных для улучшения управления мощностью реакторной установки (РУ) в маневренных режимах. В связи с этим, был разработан специальный алгоритм управления мощностью РУ, в котором внедрено температурное регулирование с целью уменьшения амплитуды воздействия других регуляторов, таких как борная кислота и органы регулирования СУЗ.

Настоящая статья посвящена анализу влияния температурного регулирования на режимы слежения за нагрузкой для РУ с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, на величину аксиального офсета и на объем водообмена при управлении мощностью энергоблоков в маневренном режиме. Результаты работы позволяют сделать следующий вывод: использование температурного регулирования в режимах слежения за нагрузкой позволяет удерживать текущий аксиальный офсет в рекомендуемой области и позволяет снизить водообмен более чем на 40%.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, температурное регулирование, аксиальный офсет, водообмен

DOI: 10.1134/S2304487X20030037

ВВЕДЕНИЕ

Для регулирования нагрузки энергосистемы широко применяются существующие тепловые электростанции, а действующие АЭС в основном используются в базовом режиме. Однако, задача работы АЭС в маневренных режимах с каждым годом становится все более актуальной. При этом для обеспечения работы АЭС в этих режимах предлагается разработать усовершенствованные алгоритмы управления [1–3]. При этом сложность такой задачи управления для РУ с ВВЭР заключается в том, что изменение мощности реактора приводит к возникновению в активной зоне нестационарного ксенонового отравления, которое влияет на локальные мощности твэл, а это в свою очередь может привести к повреждению их оболочек [4].

Напоминаем, что управление реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 заключается в перемещении ОР СУЗ и применении борного регулиро-

вания с поддержанием аксиального офсета и скорости изменения мощности в допустимых пределах с точки зрения безопасной эксплуатации АЭС. При этом следует отметить, что как в зарубежных, так и в современных российских научных работах последних лет, просматривается тенденция к применению температурного регулирования в режимах нормальной эксплуатации [5–9].

В нашей работе проведены количественные оценки влияния температурного регулирования при управлении мощностью РУ с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Для решения поставленной задачи был использован программный комплекс ПРОСТОР, предназначенный для проведения расчетов взаимосвязанных нейтронно-физических и теплогидравлических процессов, происходящих в РУ ВВЭР-1000/1200 [10], и разработан специальный алгоритм управления мощностью РУ, включающий три регулятора (ОР СУЗ, борная кислота и температура в 1 контуре), а также функцию расче-

та объема водообмена. В этом алгоритме были учтены все рекомендуемые ограничения с точки зрения безопасности эксплуатации АЭС. Разработанный алгоритм применен для управления моделями энергоблоков ВВЭР-1000/1200 в режиме слежения за нагрузкой: 15 суточных циклов с изменением мощности 100–50–100% в течение 4–6–14 часов. Полученные результаты представлены ниже, и отмечена положительная роль температурного регулирования в перспективе перехода АЭС с ВВЭР-1000/1200 от базового в маневренный режим работы.

УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ РУ С ВВЭР

На сегодняшний день энергоблоки АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 эксплуатируются в базовом режиме, поэтому в основу регулирования их мощности положено поддержание постоянного давления пара во втором контуре, поддержание постоянной средней температуры теплоносителя в первом контуре и поддержание постоянной температуры теплоносителя на входе в активную зону реактора [11, 12]. Однако оборудование первого контура этих реакторов рассчитано на возможность их эксплуатации в режиме регулирования частоты и мощности в энергосистеме. В связи с этим, регламентом нормальной эксплуатации АЭС определена скорость разгрузки и нагрузки, установлены диапазоны регулирования и другие ограничения, приведенные для ВВЭР-1000 в работе [13]. Для ВВЭР-1200 эти ограничения будут иными: при увеличении мощности реактора в диапазоне от минимально-контролируемого уровня мощности (МКУ) до 45% $W_{\text{ном}}$ и от 45 до 100% $W_{\text{ном}}$, скорость набора мощности не должна превышать 3% $W_{\text{ном}}$ /мин и 1% $W_{\text{ном}}$ /мин соответственно, а при уменьшении мощности в диапазоне от 100% до МКУ, скорость разгрузки не должна превышать 3% $W_{\text{ном}}$ /мин. При повышении мощности после длительной работы (более 2-х недель) на любом пониженном уровне мощности от 45% $W_{\text{ном}}$ скорость набора мощности не более 10% $W_{\text{ном}}$ /час, а от 80% $W_{\text{ном}}$ — не более 1% $W_{\text{ном}}$ /час. Скорость изменения температуры ($\Delta T/\Delta t$) и давления во втором контуре ($\Delta P/\Delta t$) не более 10°C/час и 0.04 МПа/мин соответственно.

При этом во время маневрирования требуется поддерживать равномерность энерговыделения по высоте активной зоны, а также соблюдать ограничения нормальной эксплуатации АЭС [14, 15]. Текущее высотное энерговыделение контролируется с помощью офсет-мощностной фазовой диаграммы [16], когда поддержание текущей фазовой точки в рекомендуемой области диаграммы, путем определения направления перемещения ОР СУЗ по высоте активной зоны, ограничивает изменение локальной мощности, а также

сдерживает развитие аксиальных ксеноновых колебаний [17–20]. При снижении мощности допускается выход текущей точки диаграммы за пределы рекомендуемой области на время не более 12 ч, но в любом случае при увеличении мощности в диапазоне 75–100% текущая точка должна находиться в рекомендуемой области. Таким образом, можно сказать, что аксиальный офсет (АО) является количественной мерой равномерности энерговыделения реактора [21–24].

РАЗРАБОТАННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

В настоящей статье рассматриваются результаты применения температурного регулирования при управлении мощностью РУ с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 при суточном маневрировании мощностью 100–50–100%. График нагрузки состоит из следующих этапов: снижения мощности от 100 до 50%, работы на мощности 50% в течение 6 ч, увеличения мощности до 100% и работы на этой мощности до конца текущих суток. Мощность изменяется со скоростью 1%/мин. В работе анализируются 15 повторяющихся суточных циклов. Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса ПРОСТОП в условиях стационарных кампаний ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Для управления мощностью реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 был разработан алгоритм, использующий следующие управляющие воздействия на мощность активной зоны: температуру на входе в реактор, концентрацию борной кислоты в реакторе и перемещения ОР СУЗ. В алгоритме так же используется функция для вычисления допустимых границ аксиального офсета в зависимости от текущей мощности реактора. Полученные границы были использованы для ограничения перемещения ОР СУЗ.

При этом регулирующие функции были описаны уравнениями (1)–(11):

$$T = W \cdot \frac{(296.2 - 285.0)}{(100 - 0)} + 285.0 + 9.5 \cdot (P_{2K} - P_{\text{ном}}) \quad \text{для ВВЭР-1200,} \quad (1)$$

$$T = W \cdot \frac{(289.0 - 278.0)}{(100 - 0)} + 278.0 + 9.5 \cdot (P_{2K} - P_{\text{ном}}) \quad \text{для ВВЭР-1000,} \quad (2)$$

где:

- T — температура теплоносителя на входе в реактор при изменении мощности и давления во втором контуре, °C;
- W — текущая мощность реактора, %;
- P_{2K} — давление пара во втором контуре, МПа;

• $P_{\text{НОМ}}$ — давление пара во втором контуре при номинальной мощности (6.8 МПа для ВВЭР-1200 и 5.815 МПа для ВВЭР-1000).

$$AO = \frac{(W_{\text{Верх}} - W_{\text{Низ}})}{(W_{\text{Верх}} + W_{\text{Низ}})} \cdot 100, \quad (3)$$

$$AO_{\text{Ц}} = -2.6 + (AO_{\text{Стаб}} + 2.6)W_{\text{Стаб}}/100, \quad (4)$$

$$AO_{\text{Верх}} = -2.6 + (AO_{\text{Ц}} + 7.6)100/W, \quad (5)$$

$$AO_{\text{Низ}} = -2.6 + (AO_{\text{Ц}} - 2.4)100/W, \quad (6)$$

где:

- AO — текущий аксиальный офсет, %;
- $W_{\text{Верх}}$ — мощность верхней половины активной зоны реактора, %;
- $W_{\text{Низ}}$ — мощность нижней половины активной зоны реактора, %;
- $AO_{\text{Ц}}$ — центральный офсет, соответствующий центральной траектории, %;
- $AO_{\text{Стаб}}$ — стабильный офсет (12 суток работы на постоянной мощности), %;
- $W_{\text{Стаб}}$ — постоянная мощность (12 суток работы на данной мощности), %;
- W — текущая мощность реактора, %;
- $AO_{\text{Верх}}$ — верхняя граница коридора разрешенных значений AO , %;
- $AO_{\text{Низ}}$ — нижняя граница коридора разрешенных значений AO , %.

Различные значения стабильного офсета $AO_{\text{Стаб}}$, т.е. такого офсета, который получился вследствие работы реактора более 12 суток на постоянной мощности, для различных топливных загрузок и моментов топливной кампании приведут к разным значениям центрального офсета ($AO_{\text{Ц}}$), а следовательно, и к разным значениям допустимых границ $AO_{\text{Верх}}$ и $AO_{\text{Низ}}$.

Так же для работы алгоритма нужно уметь переходить от мощности реактора к мощности турбогенератора, поскольку график несения нагрузки задается для электрической мощности. При этом нужно отметить, что величина тепловых потерь на парогенераторах составляет около 0.5%. Так же для более точной оценки электрической мощности следует учитывать, что КПД зависит от температуры окружающей среды и величины вакуума в конденсаторе, что в оценочных формулах (7)–(11) не учитывается.

$$W_{\text{ПГ}} = 0.998W, \quad (7)$$

$$N = 1 - W_{\text{ПГ}}/W_{\text{НОМ}}, \quad (8)$$

$$\text{КПД} = \text{КПД}_{\text{max}} - (\text{КПД}_{\text{max}} - \text{КПД}_{\text{min}}) \times (3N^2 - 2N^3) \text{ для ВВЭР-1000,} \quad (9)$$

$$\text{КПД} = 27.7716 + 0.00209505W^2 - 0.000012711W^3 \text{ для ВВЭР-1200,} \quad (10)$$

$$W_{\text{ТГ}} = W_{\text{КПД}}, \quad (11)$$

где:

- W — текущая мощность реактора, %;
- $W_{\text{ПГ}}$ — мощность парогенераторов, МВт;
- $W_{\text{НОМ}}$ — номинальная мощность активной зоны, МВт;
- КПД — коэффициент полезного действия ($\text{КПД}_{\text{max}} = 0.3628$, $\text{КПД}_{\text{min}} = 0.302$), о.е.;
- $W_{\text{ТГ}}$ — мощность турбогенератора, МВт.

Сам алгоритм управления предполагает выбор приоритетных управляющих воздействий. При поднятии мощности реактора были выбраны следующие приоритеты: изменение температуры на входе в реактор, ввод/вывод борной кислоты в реактор, затем перемещение ОР СУЗ, а для других этапов графика нагрузки, приоритеты управляющих воздействий были следующие: изменение температуры, перемещение ОР СУЗ, а затем ввод/вывод борной кислоты.

Для оценки объемов водообмена были использованы следующие уравнения:

$$\frac{\partial C(t)}{\partial t} = \frac{G}{V \cdot \rho} (C_{\text{подпитки}} - C(t)), \quad (12)$$

$$C(t)|_{t=0} = C_0, \quad (13)$$

$$G \cdot T_{\text{подпитки}} = V \cdot \rho \cdot \ln \left[\frac{C_{\text{подпитки}} - C_0}{C_{\text{подпитки}} - C} \right], \quad (14)$$

где:

- $C(t)$ — текущая концентрация борной кислоты в первом контуре, г/кг;
- C_0 — концентрация борной кислоты в первом контуре на момент начала водообмена, г/кг;
- $T_{\text{подпитки}}$ — время, в течение которого происходит подпитка, ч;
- C — концентрация борной кислоты в первом контуре на момент завершения подпитки, г/кг;
- G — расход подпитки, т/ч;
- ρ — плотность теплоносителя первого контура, т/м³;
- V — объем теплоносителя первого контура, приблизительно 300 м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим результаты моделирования управления мощностью ВВЭР-1200 для середины (170 эфф. сутки) восьмой топливной кампании 6 блока Нововоронежской АЭС и мощностью ВВЭР-1000 для середины (291 эфф. сутки) двенадцатой топливной кампании 3 блока Калинин-

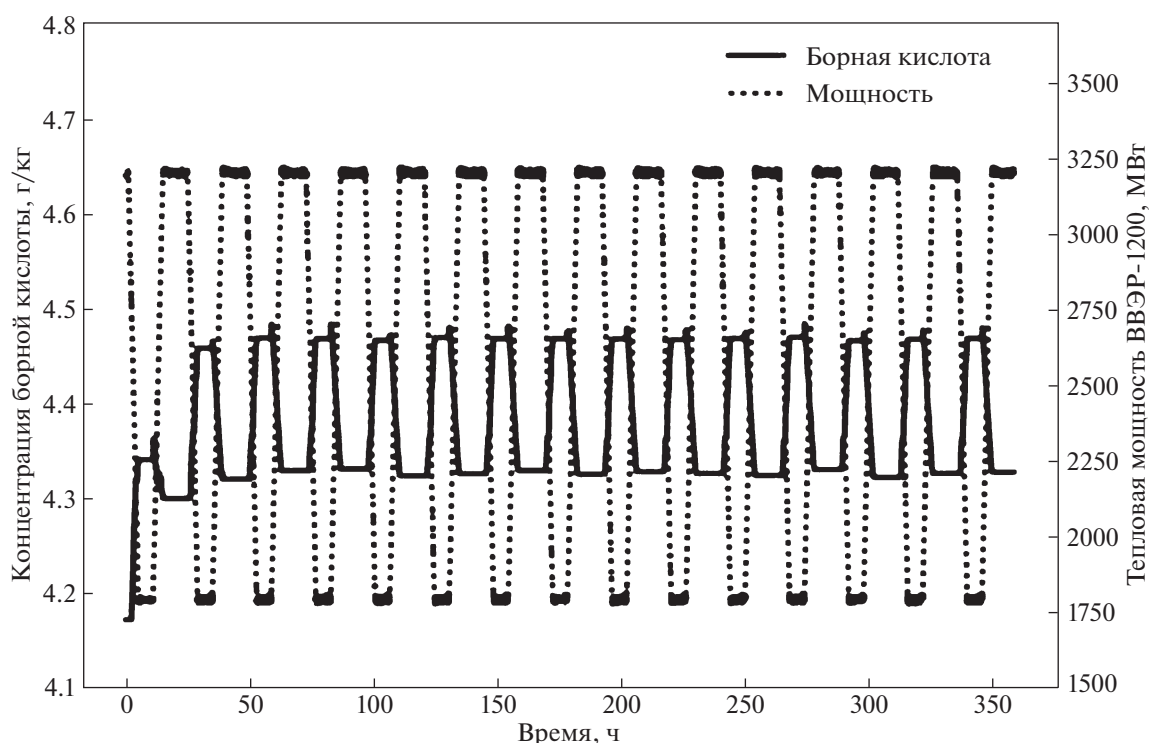


Рис. 1. Концентрации борной кислоты в реакторе ВВЭР-1200 при суточном маневре мощностью и широком диапазоне температурного регулирования $\Delta P = \pm 0.3$ МПа.

ской АЭС. При моделировании работы этих реакторов в маневренном режиме 100-50-100% было отмечено, что во время первых циклов переменного графика нагрузки, параметры управляющих воздействий (положения ОР СУЗ, температура на входе и концентрация борной кислоты в реакторе) проходят через несколько циклов нестационарных изменений. Продемонстрируем это на рис. 1 для ВВЭР-1200, для ВВЭР-1000 ситуация будет аналогичной.

Для более наглядного представления полученных результатов управления мощностью РУ, были выбраны 2 последних установившихся цикла из 15. Результаты моделирования приведены соответственно на рис. 2 и 3 для двух случаев выбранного диапазона изменения давления пара во втором контуре реактора, а именно:

- без температурного регулирования ($\Delta P = 0$ МПа);
- широкий диапазон температурного регулирования ($\Delta P = \pm 0.3$ МПа).

При анализе полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

- При применении широкого диапазона температурного регулирования ($\Delta P = \pm 0.3$ МПа) качество слежения за нагрузкой для ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 возросло (см. рис. 2, кривые мощности, точки *A, B, C* и *D*).

- Внедрение температурного регулирования ($\Delta P = \pm 0.3$ МПа) при управлении ВВЭР-1200 привело к значительному уменьшению амплитуд борного регулирования и перемещения ОР СУЗ (см. рис. 2, кривые *H* групп и H_3BO_3 , точки *E* и *G*): операция водообмена и перемещение ОР СУЗ становились прерывными по сравнению с отсутствием температурного регулирования. Что касается ВВЭР-1000, максимальное использование температурного регулирования приводило к меньшим амплитудам изменения концентрации борной кислоты и положения ОР СУЗ (см. рис. 2, кривые *H* групп и H_3BO_3 , точки *F* и *H*).

- Продолжается увеличение температуры теплоносителя на этапе работы реакторов ВВЭР-1000/1200 на номинальной мощности (см. рис. 2, кривые *T1K*, точки *I* и *J*) в целях ввода дополнительной реактивности для компенсации ксенонового разотравления.

- Как показано на рис. 2 и 3, во время маневрирования для всех трех режимов температурного регулирования (отсутствие, малый диапазон и широкий диапазон) для ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 аксиальный офсет (*АО*) находился в рекомендуемой области, что было реализовано путем ограничения на перемещение ОР СУЗ по высоте активной зоны.

Кроме того, для всех режимов регулирования были выполнены оценки водообмена в 1 контуре,

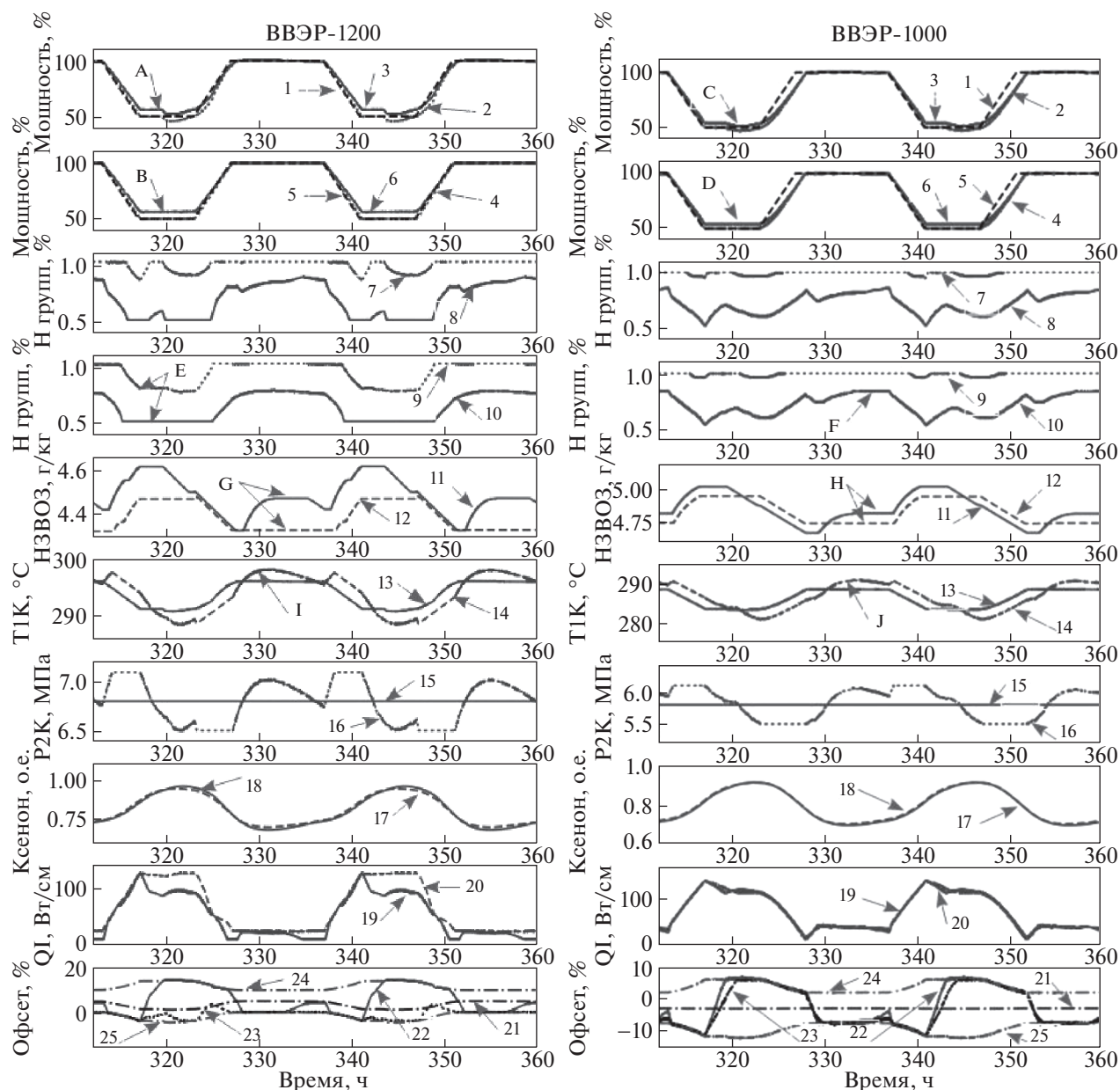


Рис. 2. Изменение параметров ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000 при работе в суточном графике несения нагрузки 100-50-100%: 1, 2, 3 – Мощность (график нагрузки, активная зона и генератор) соответственно ($\Delta P = 0$ МПа); 4, 5, 6 – Мощность (график нагрузки, активная зона и генератор) соответственно ($\Delta P = \pm 0.3$ МПа); 7, 8 – Положение органов регулирования (H_{11} , H_{12}) соответственно ($\Delta P = 0$ МПа); 9, 10 – Положение органов регулирования (H_{11} , H_{12}) соответственно ($\Delta P = \pm 0.3$ МПа); 11, 12 – Концентрация борной кислоты в реакторе соответственно ($\Delta P = 0$ МПа, ± 0.3 МПа); 13, 14 – Температура в первом контуре соответственно ($\Delta P = 0$ МПа, ± 0.3 МПа); 15, 16 – Давление во втором контуре соответственно ($\Delta P = 0$ МПа и ± 0.3 МПа); 17, 18 – Ксенон в центре активной зоны соответственно ($\Delta P = 0$ МПа, ± 0.3 МПа); 19, 20 – Запас по линейной нагрузке соответственно ($\Delta P = 0$ МПа, ± 0.3 МПа); 21 – Центральный офсет; 22, 23 – Текущий офсет соответственно ($\Delta P = 0$ МПа, ± 0.3 МПа); 24, 25 – Верхняя и нижняя граница аксиального офсета.

поскольку удаляемый теплоноситель можно рассматривать как жидкие радиоактивные отходы. Эти оценки позволяют количественно оценить эффект от внедрения температурного регулирования в структуру разработанного алгоритма. Полученные результаты представлены на рис. 4 для всех рассмотренных вариантов допустимого диапазона изменения давления во втором контуре.

Полученные результаты, показанные на рис. 4, позволяют подтвердить важность использования температурного регулирования с увеличенным диапазоном изменения давления во втором контуре. Таким образом, переходя от $\Delta P = 0$ МПа к $\Delta P = \pm 0.05$ МПа, а затем к $\Delta P = \pm 0.3$ МПа, мы получили снижение водообмена соответственно на 7.24% и 41.50% для ВВЭР-1000 и на 24.6% и 50.36% для ВВЭР-1200.

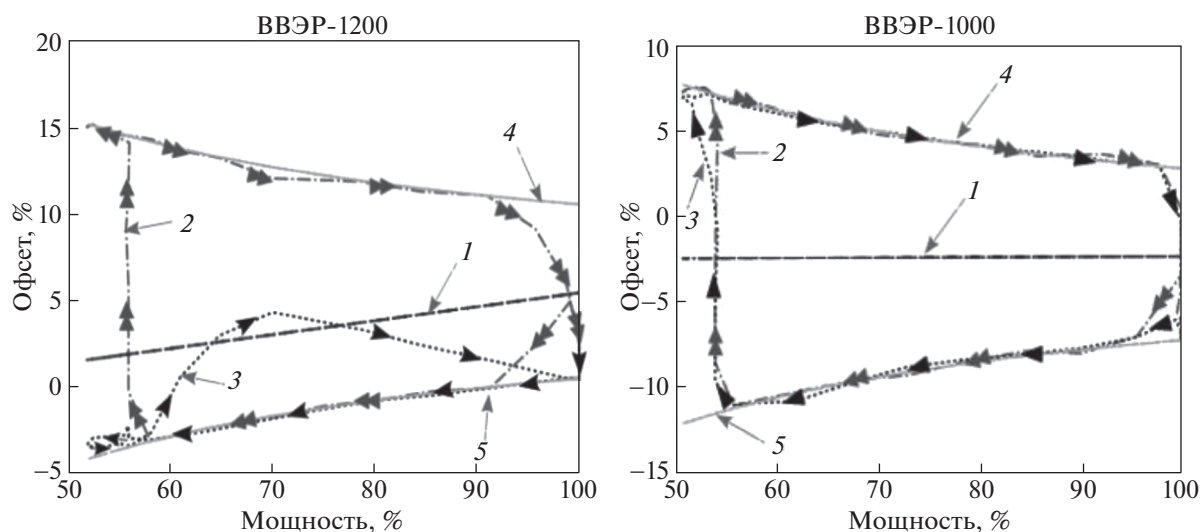


Рис. 3. Офсет-мощностная фазовая диаграмма управления реакторами ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000 в суточном цикле 100–50–100%: 1 – Центральный офсет; 2, 3 – Текущий офсет соответственно ($\Delta P = 0$ МПа, ± 0.3 МПа); 4, 5 – Верхняя и нижняя граница аксиального офсета.

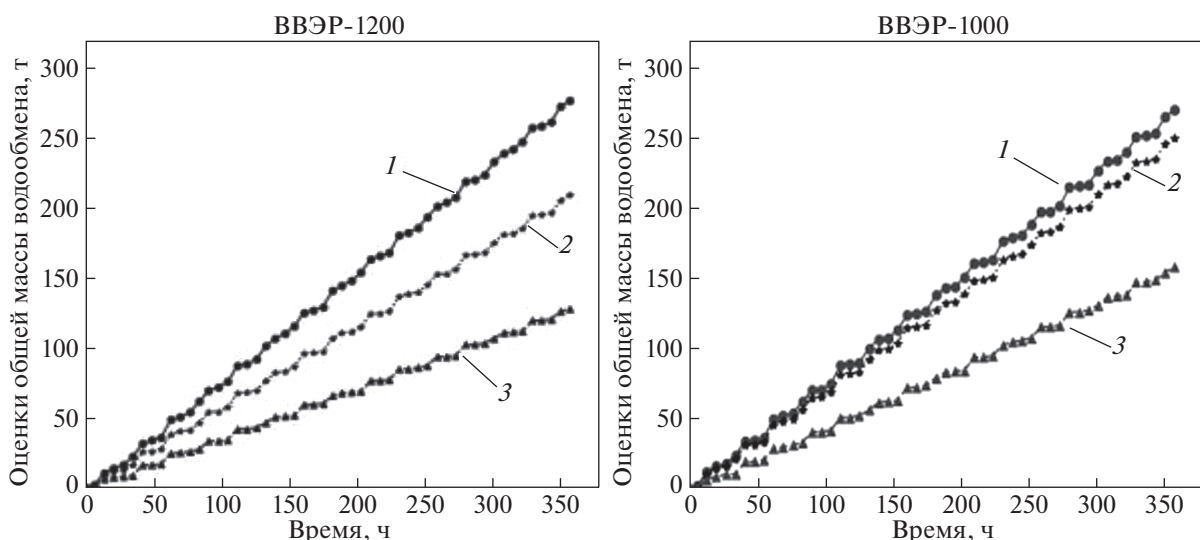


Рис. 4. Оценки затрат водообмена при различных вариантах работы разработанного алгоритма для ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000: 1 – Без температурного регулирования ($\Delta P = 0$ МПа); 2 – Низкий диапазон регулирования ($\Delta P = \pm 0.05$ МПа); 3 – Широкий диапазон регулирования ($\Delta P = \pm 0.3$ МПа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают эффективность применения температурного регулирования для поддержания заданного графика нагрузки и снижения водообмена в первом контуре. Причем чем больше возможность изменения температуры в первом контуре за счет допустимого изменения давления во втором контуре, тем лучше для управления. При этом достигается уменьшение влияния борного регулирования и, следовательно, значительно снижается водообмен в

первом контуре: на 41.50% для ВВЭР-1000 и на 50.36% для ВВЭР-1200. При этом текущий АО всегда поддерживается в допустимой области.

Однако, прежде чем использовать эти алгоритмы на АЭС, следует уточнить теплотехническую надежность парогенераторов, т.к. количество циклов, глубина и скорости их нагрузки–разгрузки могут быть ниже возможностей реактора. А сами циклические нагрузки могут неблагоприятно сказаться на их ресурсе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянова С.П., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е.* Внедрение усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением активной зоны ВВЭР-1000 на Хмельницкой АЭС // Журн. Атомная энергия. 2015. Т. 98. № 6. С. 414–421.
2. *Аверьянова С.П., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М. и др.* Испытание усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением ВВЭР-1000 в условиях маневренных режимов на Тяньваньской АЭС (Китай) // Журн. Атомная энергия. Т. 103. № 5. С. 277–282.
3. *Averyanova S.P., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. et al.* Adoption of improved algorithms for controlling the energy release of a VVER-1000 core at the KHMEL'NITSKIY nuclear power plant // Журн. Atomic Energy. 2005. V. 98. № 6. P. 386–393.
4. *Maksimov M.V., Kanazirskiy N.F., Kokol E.A.* Control of the axial offset in a nuclear reactor at power maneuvering // Журн. Праці Одеського політехнічного університету. 2014. V. 2. № 44. P. 75–81. doi: 2.44.2014.15. <https://doi.org/10.15276/OPU>
5. *Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Филимонов П.Е.* Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000 // Журн. Атомная энергия. 2010. Т. 109. № 4. С. 199–202.
6. *Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б. и др.* Работа ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки // Журн. Атомная энергия, 2012. Т. 113. № 5. С. 247–252.
7. *Данилова Е.А., Малимоненко Д.В.* Работа энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 в маневренном режиме при минимальном борном регулировании // Журн. Світлотехніка та електроенергетика. 2010. Т. 1. С. 71–76.
8. *Баскаков В.Е., Максимов М.В., Маслов О.В.* Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы // Журн. Труды Одесского политехнического университета, 2007. Т. 2. № 28. С. 56–60.
9. *Тодорцев Ю.К., Фоц Т.В., Никольский М.В.* Анализ методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором при маневрировании // Журн. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. Т. 6. № 66. С. 2–9.
10. *Выговский С.Б., Королев С.А., Чернов Е.В. и др.* Опыт использования программного комплекса “ПРОСТОР” в расчетной поддержке эксплуатации АЭС с ВВЭР // Журн. Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. № 1. С. 15–28. <https://doi.org/10.1134/S2079562914010151>
11. *Тодорцев Ю.К., Цисельская Т.А., Никольский М.В.* Автоматизированная система регулирования мощности энергоблока для управления ЯЭУ в маневренных режимах с постоянной температурой входа в реактор // Журн. Ядерна та радіаційна безпека. 2013. Т. 4. № 60. С. 20–25.
12. *Фоц Т.В., Никольский М.В., Максимов М.В.* Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет // Журн. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 2. № 68. С. 19–27.
13. *Подшибякин М.А., Коноплев Н.П., Горохов А.К. и др.* Требования к характеристикам маневренности АЭС и аспекты их выполнения в новых проектах реакторных установок с ВВЭР. ФГУП ОКБ “Гидропресс”, Подольск.
14. *Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б. и др.* Развитие способов управления ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки // Журн. Атомная энергия. 2013. Т. 114. № 5. С. 249–254.
15. *Выговский С.Б., Аль Малкави Р.Т., Хачатрян А.Г. и др.* Оптимизация алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для минимизации водообмена в 1-м контуре при реализации суточных маневренных режимов // Журн. Глобальная ядерная безопасность. 2018. Т. 3. № 28. С. 49–63.
16. *Аверьянова С.П., Вохмянина Н.С., Злобин Д.А. и др.* Метод офсет-мощностной фазовой диаграммы для управления энерговыделением реактора // Журн. Атомная энергия. 2016. Т. 121. № 3. С. 123–127.
17. *Yoichiro SHIMAZU.* Xenon oscillation Control in large PWRs using a characteristic ellipse trajectory drawn by three axial offsets // Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY. 2008. V. 45. № 4. P. 257–262.
18. *Parhizkari H., Aghaie M., Zolfaghari A.* An approach to stability analysis of spatial xenon oscillations in WWER-1000 reactors // Annals of Nuclear Energy. 2015. V. 79. P. 125–132.
19. *Максимов М.В., Беглов К.В., Каназирский Н.Ф.* Управление аксиальным офсетом ядерного реактора при маневрировании мощностью // Журн. Атоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2015. Т. 7. № 1. С. 54–58.
20. *Фоц Т.В.* Анализ аксиального офсета энергоблока с ВВЭР-1000 в режиме маневрирования // Журн. Праці Одеського політехнічного університету. 2014. Т. 1. № 43. С. 97–103. <https://doi.org/10.15276/OPU.1.43.2014.18>
21. *Никольский М.В.* Аксиальный офсет как мера устойчивости легководного ядерного реактора при суточном маневре мощностью // Журн. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2014. Т. 6. № 4. С. 65–71.
22. *Пелых С.Н., Назаренко А.А., Цисельская Т.А.* Анализ устойчивости активной зоны ядерного реактора ВВЭР-1000 при различных программах регулирования РУ // Журн. Электроэнергетика. 2011. Т. 2. № 36. С. 109–114.
23. *Аверьянова С.П., Филимонов П.Е.* Ксеноновая устойчивость ВВЭР-1200 // Журн. Атомная энергия. 2009. Т. 107. № 6. С. 347–352.
24. *Аверьянова С.П., Дубов А.А., Филимонов П.Е.* Суперпозиция интегральных и аксиальных ксеноновых колебаний и устойчивость энерговыделения активной зоны ВВЭР-1000 // Журн. Атомная энергия. 2011. Т. 111. № 1. С. 8–13.

Temperature Regulation Contribution during the Power Control of the VVER-1000 and VVER-1200 Reactors in a Load-Following Mode

B. Djaroum^{a, #}, D. A. Solovyev^a, A. A. Semenov^a, N. V. Schukin^a, S. B. Vygovsky^a, A. I. Al-Shamayleh^a, and H. A. Tanash^a

^a National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

[#]e-mail: bel.djar111215@gmail.com, vulture@inbox.ru

Received June 26, 2020; revised June 26, 2020; accepted September 8, 2020

Abstract—Thermal power plants are the most flexible concerning power level regulation. Furthermore, nuclear power plants are preferentially used for base load. Presently, electrical power systems require continuous adjustment of the nuclear energy produced. Consequently, it becomes imperative to adapt nuclear power plants to new specific operating conditions in load following operation. To solve this problem, advanced algorithms are proposed for the improvement of power control at nuclear power plants. Therefore, a special algorithm has been developed in which temperature regulation is introduced to reduce the amplitude impact of existing regulators, such as control rods and dissolved boric acid. The effect of temperature regulation on load following modes for VVER-1000 and VVER-1200 reactors, on the axial offset, and on the volume of water exchange required to control the reactor power is analyzed in this work. It has been found that the use of temperature regulation to operate nuclear power plants in load following modes makes it possible to keep the current axial offset in the recommended area and to reduce water exchange by more than 40%.

Keywords: nuclear power plants, VVER-1000, VVER-1200, temperature regulation, axial offset, water exchange

DOI: 10.1134/S2304487X20030037

REFERENCE

1. Averyanova S.P., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. Vnedreniye usovershenstvovannykh algoritmov upravleniya energovydeleniyem aktivnoy zony VVER-1000 na Khmel'nitskoy AES [Implementation of advanced algorithms for controlling energy release of the VVER-1000 core at the Khmel'nitsky NPP] // *Atomnaya energiya*. 2015. V. 98. № 6. P. 414–421 (in Russian).
2. Averyanova S.P., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M. a.all. Ispytaniye usovershenstvovannykh algoritmov upravleniya energovydeleniyem VVER-1000 v usloviyakh manevrennykh rezhimov na tyan'van'skoy AES (kitay) [Testing advanced algorithms for controlling the energy release of VVER-1000 under conditions of load following operation at the Tianwan NPP (China)] // *Atomnaya energiya*. 2007. V. 103. № 5. P. 277–282 (in Russian).
3. Averyanova S.P., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. a.all. Adoption of improved algorithms for controlling the energy release of a VVER-1000 core at the KHMEL'NITSKII nuclear power plant // *Atomic Energy*. 2005. V. 98. №. 6. P. 386–393.
4. Maksimov M.V., Kanazirskiy N.F., Kokol E.A. Control of the axial offset in a nuclear reactor at power maneuvering // *Pratsi Odes'koho politekhnichnoho universitetu*. 2014. V. 2. № 44. P. 75–81. <https://doi.org/10.15276/opu.2.44.2014.15>.
5. Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. a.all. Temperaturnoye regulirovaniye i manevrennost' VVER-1000 [Temperature regulation and maneuverability of VVER-1000] // *Atomnaya energiya*. 2010. V. 109. № 4. P. 199–202 (in Russian).
6. Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. a.all. Rabota VVER-1200/1300 v sutochnom grafike nagruzki [Operation of VVER-1200/1300 in load following mode] // *Atomnaya energiya*. 2012. V. 113. № 5. P. 247–252 (in Russian).
7. Danilova E.A., Malimonenko D.V. Rabota energobloka AES reaktorom VVER-1000 v manevrennom rezhime pri minimal'nom bornom regulirovanii [Operation of the NPP power unit with the VVER-1000 reactor in maneuvering mode with minimal boron regulation] // *SVITLOTEHNIKA TA ELECTRICITY*. 2010. V. 1. P. 71–76 (in Russian).
8. Baskakov V.E., Maksimov M.V., Maslov O.V. Algoritm ekspluatatsii energobloka s VVER v podderzhanii sutochnogo balansa moshchnosti energosistemy [The operation algorithm of the VVER power unit in maintaining the daily balance of the power system capacity] // *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2007. V. 2. № 28. P. 56–60 (in Russian).
9. Todortsev Yu.K., Foshch T.V., Nikolsky M.V. Analiz metodov upravleniya moshchnost'yu energobloka s vodo- vodyanym reaktorom pri manevrirovanii [Analysis of methods for controlling the power of a power unit

- with a water-cooled reactor during maneuvering] // East European Journal of Advanced Technology. 2013. V. 6. № 66. P. 2–9 (in Russian).
10. Vygovsky S.B., Korolev S.A., Chernov E.V. a.all. Opyt ispol'zovaniya programmnogo kompleksa "PROSTOR" v raschetnoy podderzhke ekspluatatsii AES s VVER [Use of the PROSTOR software package experience in the design support for the operation of nuclear power plants with VVER] // Nuclear Physics and Engineering. 2014. V. 5. № 1. P. 15–28. <https://doi.org/10.1134/S2079562914010151> (in Russian).
 11. Todortsev Yu.K., Tsiselskaya T.A., Nikolsky M.V. Avtomatizirovannaya sistema regulirovaniya moshchnosti energobloka dlya upravleniya YAEU v manevrennykh rezhimakh s postoyannoy temperaturoy vkhoda v reaktor [Automated power unit power control system for controlling a nuclear power plant in maneuvering modes with a constant reactor inlet temperature] // Nuclear and radiant bezpeka. 2013. V. 4. № 60. P. 20–25 (in Russian).
 12. Fosch T.V., Nikolsky M.V., Maximov M.V. Analiz vliyaniya metodov upravleniya moshchnost'yu energobloka s vodo-vodyanym reaktorom na aksial'nyy ofset [Analysis of the influence of power control methods for a power unit with a water-water reactor on axial offset] // Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. 2014. V. 2. № 68. P. 19–27 (in Russian).
 13. Podshibyakin M.A., Konoplev N.P., Gorokhov A.K. a. all. Trebovaniya k kharakteristikam manevrennosti AES i aspekty ikh vypolneniya v novykh proyektakh reaktornykh ustanovok s VVER [Requirements for the maneuverability characteristics of nuclear power plants and aspects of their implementation in new designs of reactor plants with VVER. FGUP OKB "Gidropress", Podol'sk.
 14. Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. a. all. Razvitiye sposobov upravleniya VVER-1200/1300 v sutochnom grafike nagruzki [Development of VVER-1200/1300 control methods in load following mode] // Atomnaya energiya. 2013. V. 114. № 5. P. 249–254 (in Russian).
 15. Vygovsky S.B., Al Malkavi R.T., Khachatryan A.G. a. all. Optimizatsiya algoritmov upravleniya YAEU s VVER-1200 dlya minimizatsii vodoobmena v 1-om konture pri realizatsii sutochnykh manevrennykh rezhimov [Optimization of control algorithms for nuclear power plants with VVER-1200 to minimize water exchange in the first circuit during the implementation of daily maneuvering modes] // Global'naya yadernaya bezopasnost. 2018. V. 3. № 28. P. 49–63 (in Russian).
 16. Averyanova S.P., Vokhmyanina N.S., Zlobin D.A. a.all. Metod ofset-moshchnostnoy fazovoy diagrammy dlya upravleniya energovydeleniyem reaktora [Offset-power phase diagram method for controlling reactor energy release] // Atomnaya energiya. 2016. V. 121. № 3. P. 123–127 (in Russian).
 17. Yoichiro SHIMAZU. Xenon oscillation Control in large PWRs using a characteristic ellipse trajectory drawn by three axial offsets // Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY. 2008. V. 45. № 4. P. 257–262.
 18. Parhizkari H., Aghaie M., Zolfaghari A. a. all. An approach to stability analysis of spatial xenon oscillations in WWER-1000 reactors // Annals of Nuclear Energy. 2015. V. 79. P. 125–132.
 19. Maksimov M.V., Beglov K.V., Kanazirsky N.F. Upravleniye aksial'nyim ofsetom yadernogo reaktora pri manevrirovanii moshchnost'yu [Control of axial offset of a nuclear reactor during power maneuvering] // avtomatyzatsiya tekhnologichnykh i biznes-protseiv. 2015. V. 7. № 1. P. 54–58 (in Russian).
 20. Foshch T.V. Analiz aksial'nogo ofseta energobloka s VVER-1000 v rezhime manevrirovaniya [Analysis of the axial offset of a power unit with VVER-1000 in maneuvering mode] // Pratsi Odes'koho politekhnichnoho universytetu. 2014. Vol. 1. № 43. P. 97–103. <https://doi.org/10.15276/OPU:1.43.2014.18> (in Russian).
 21. Nikolsky M.V. Aksial'nyy ofset kak mera ustoychivosti legkovodnogo yadernogo reaktora pri sutochnom manevre moshchnost'yu [Axial offset as a measure of the stability of a light-water nuclear reactor with daily power maneuver] // avtomatyzatsiya tekhnologichnykh i biznes-protseiv. 2014. V. 6. № 4. P. 65–71 (in Russian).
 22. Pelykh S.N., Nazarenko A.A., Tsiselkaya T.A. Analiz ustoychivosti aktivnoy zony yadernogo reaktora VVER-1000 pri razlichnykh programmakh regulirovaniya RU [Analysis of the stability of the core of a VVER-1000 nuclear reactor under various reactor control programs] // ELEKTROENERGETIKA. 2011. V. 2. № 36. P. 109–114 (in Russian).
 23. Averyanova S.P., Filimonov P.E. Ksenonovaya ustoychivost' VVER-1200 [Xenon stability of VVER-1200] // Atomnaya energiya. 2009. V. 107. № 6. P. 347–352 (in Russian).
 24. Averyanova S.P., Dubov A.A., Filimonov P.E. Superpozitsiya integral'nykh i aksial'nykh ksenonovykh kolebaniy i ustoychivost' energovydeleniya aktivnoy zony VVER-1000 [Superposition of integral and axial xenon vibrations and stability of energy release of the WWER-1000 core] // Atomnaya energiya. 2011. V. 111. № 1. P. 8–13 (in Russian).