

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЯЭУ С ВВЭР-1200 ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СУТОЧНЫХ МАНЕВРЕННЫХ РЕЖИМОВ НА АЭС

**С.Б. Выговский, Р.Т. Аль Малкави, А. Г. Хачатрян**

*НИЯУ МИФИ, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31*



Приведены результаты численных исследований алгоритмов управления пространственным распределением нейтронного поля в активной зоне ВВЭР-1200 при реализации суточных маневренных режимов на АЭС с такими реакторами. Показана возможность автоматизированного регулирования аксиальным офсетом нейтронной мощности с использованием одной из управляющих групп ОР СУЗ для снятия психологической нагрузки на оперативный персонал АЭС в маневренных режимах. При этом происходит дополнительная минимизация водообмена при сохранении всех полевых ограничений по локальной мощности в зоне. Исследования проводились на базе программного комплекса (ПК) ПРОСТОР. Данный комплекс используется в настоящее время в УТП Ново-Воронежской АЭС для проведения занятий с оперативным персоналом АЭС и их обучения оптимальным алгоритмам управления энергоблоком в маневренных режимах. Предложена методология настройки параметров офсетного регулирования в зависимости от нейтронно-физических характеристик активной зоны. Актуальность проведенных исследований связана с тем, что на НВАЭС-2 и ЛАЭС-2 по проекту АЭС-2006 предполагается тестирование суточных режимов работы АЭС с маневрированием мощности в широком интервале их значений. Проведение этих испытаний необходимо для подтверждения работоспособности энергоблоков в суточных режимах по ряду зарубежных контрактов с РФ и повышения конкурентной способности оборудования АЭС с ВВЭР за рубежом.

**Ключевые слова:** ВВЭР-1200, офсетно-мощностная фазовая диаграмма, аксиальный офсет (АО), автоматический регулятор мощности (АРМ), алгоритм управления, водообмен.

### ВВЕДЕНИЕ

Сложность задачи заключается в том, что маневренные режимы с изменением мощности в течение суток приводят к возникновению нестационарного отравления активной зоны ксеноном и, как следствие, к возможности ксеноновых колебаний локальной мощности по объему зоны. В случае маневренных режимов стоит задача обеспечить управляемый процесс без ксеноновых колебаний с целью неперевышения полевых ограничений по локальной мощности в зоне и минимизацию водообмена в первом контуре, который является очень затратной операцией на АЭС.

Для безопасной эксплуатации энергоблока с ВВЭР-1200 в маневренном режиме необходимо, чтобы поддерживалось устойчивое пространственное распределение

© С.Б. Выговский, Р.Т. Аль Малкави, А. Г. Хачатрян, 2019

энерговыведений по объему активной зоны как в ночном, так и дневном режимах.

Количественной мерой устойчивости реактора служит аксиальный офсет (АО), поэтому показателем эффективности эксплуатации энергоблока с ВВЭР-1200 является минимизация отклонения АО в ночном и дневном интервалах по времени от их стационарных значений, которые не должны сильно отличаться друг от друга. Стационарные значения устанавливаются из области разрешенных значений аксиального офсета близкими друг к другу как в ночном, так и дневном режимах.

При реализации суточных режимов помимо обеспечения устойчивости реактора и теплотехнической безопасности зоны есть и не менее важная задача – минимизация водообмена. В этом случае обеспечить минимальные отклонения от постоянного значения аксиального офсета мощности очень затруднительно. Поэтому для маневренных режимов пользуются разрешенной областью значений офсета, которая определяется офсетно-мощностной фазовой диаграммой, рассчитываемой для каждого момента кампании. Из этой диаграммы можно определить квазистационарные значения аксиального офсета для ночного и дневного режимов, которые могут быть существенно различными.

Поддержание текущей фазовой точки – значения офсета – в рекомендуемой области диаграммы ограничивает изменение локальной мощности, а также сдерживает развитие аксиальных ксеноновых колебаний. На энергоблоках ВВЭР-1200, введенных в эксплуатацию, офсетно-мощностная диаграмма является необходимым элементом информационной поддержки оператора. Диаграмма выводится на экран рабочего монитора оператора с помощью входящей в состав расчетной поддержки эксплуатации программы ИР. Данная программа оперирует офсетно-мощностной диаграммой, которая определяет разрешенную область значений офсета мощности.

### **МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ОФСЕТНО-МОЩНОСТНОЙ ДИАГРАММЫ**

Источником получения офсетно-мощностной диаграммы являются полевые ограничения локальной мощности, которые должны быть меньше допустимых значений локальной мощности во всем объеме активной зоны. Однако не только это требование является необходимым условием определения разрешенной области значений офсета для реализации суточных маневренных режимов. Другим условием является необходимость минимизировать отклонения значений локальной мощности в различных состояниях активной зоны от стационарных значений на номинальной мощности, при которых надежно достигается непревышение локальной мощности их полевых ограничений по объему активной зоны по данным СВРК. Выполнение этого условия не приводит к накоплению усталостных повреждений в топливных элементах при циклических нагрузках во время маневренного режима и позволяет практически без ограничения по числу циклов проводить маневрирование мощности реактора. Определение этого условия и разработка метода офсетно-мощностной фазовой диаграммы для управления распределением энерговыведений в активной зоне принадлежат НИЦ «КИ» и ВНИИНМ [1 – 3].

Приведем пример такой области для стационарной кампании 12-месячной топливной загрузки блока № 1 НВАЭС-2 на 320 эфф. суток. Эта область разрешенных значений аксиального офсета показана на рис. 1, где величины  $AO_1$  и  $AO_2$  определяют границы показанной области разрешенных значений аксиального офсета – офсетно-мощностную фазовую диаграмму.

Если для получения офсетно-мощностной диаграммы использовать только требование непревышения полевых ограничений локальной мощности в объеме зоны по данным СВРК без учета усталостных накоплений в топливе, то можно определить гораздо более широкий коридор для значений аксиального офсета при малых значениях

мощности реактора. Реализация такого режима возможна только для единичных случаев, например, при аварийном отключении большого количества потребителей.

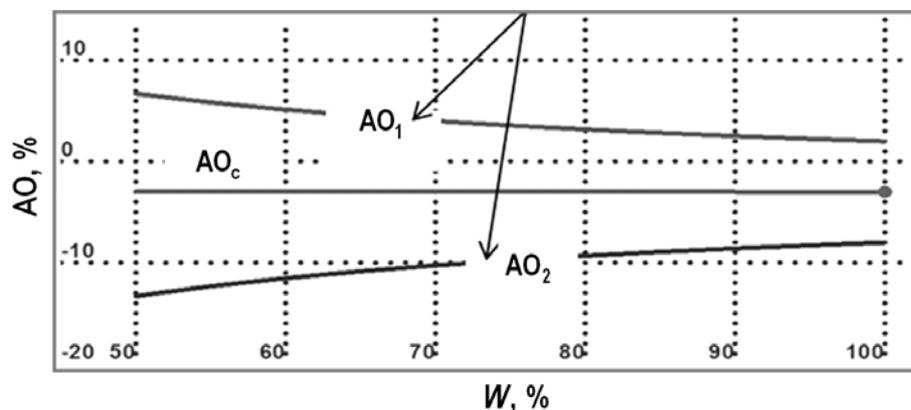


Рис. 1. Офсетно-мощностная фазовая диаграмма. Центральная линия  $AO_c$  определяет зависимость аксиального офсета от мощности для оптимальной траектории высотного распределения энерговыделений с минимальными отклонениями локальной мощности друг от друга в различных состояниях активной зоны

Расчет офсетно-мощностной фазовой диаграммы без учета усталостных накоплений в топливном элементе основан на использовании данных СВРК по значениям линейных тепловых нагрузок на твэлы в контрольных точках активной зоны в данный момент кампании. В основе лежит выполнение неравенства  $q_l(x, y, z) < 0,98q_{l \text{ lim}}(x, y, z)$  по всему объему зоны в соответствии с техническим регламентом. Приведем пример разрешенной области значений аксиального офсета, полученной по данной методике для той же стационарной топливной загрузки блока № 1 НВАЭС-2 на 320 эфф. суток (рис. 2).

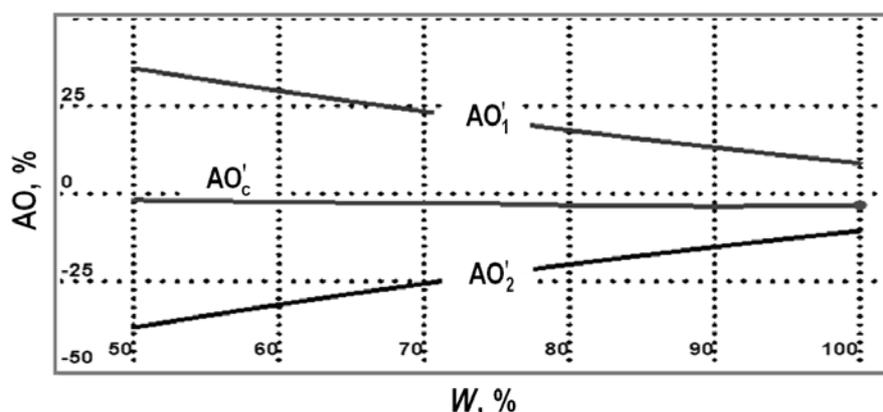


Рис. 2. Офсетно-мощностная фазовая диаграмма по данным СВРК. Центральная линия  $AO'_c$  определяет зависимость аксиального офсета от мощности при оптимальном движении управляющих групп ОР СУЗ, которая минимизирует изменения аксиального офсета от мощности

Из сопоставления приведенных офсетно-мощностных диаграмм видно, что разрешенный коридор для значений аксиального офсета в ночном режиме по методике НИЦ «КИ» гораздо меньше коридора, полученного прямым образом по данным СВРК. В дневном режиме разрешенные коридоры, полученные по разным методикам, сопоставимы. Штатный подход, основанный на обеспечении двух ограничений по топливу, является более верным, и поэтому исследование различных алгоритмов управления должно строиться на данном подходе.

**ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЙ  
В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР-1200**

При сохранении в целом схемы оптимального алгоритма управления существуют различные схемы движения управляющих групп ОР СУЗ при переходе из дневного режима в ночной [4 – 6]. При использовании штатного разрешенного коридора значений офсета 12-ю группу желательно погружать гораздо ниже 50% извлечения (15% – 35% в зависимости от момента кампании), а 11-ю группу необходимо погружать до положений примерно в соответствии с положениями по алгоритму движения групп ОР СУЗ в режиме «ПД». В этом случае перестройка нейтронных полей по объему активной зоны происходит таким образом, что величина аксиального офсета увеличивается при погружении 12-й группы ниже 50%. И это позволяет вписать значения офсета в ночном режиме в разрешенную область, полученную по штатной методике. При этом способ движения 12-й группы может быть разным. Рассмотрим алгоритмы погружения 12-й группы.

*Первый алгоритм.* 12-я группа погружается до 50% извлечения по высоте активной зоны очень медленно, примерно в течение одного часа с дополнительным вводом бора для ускорения снижения мощности. Это позволяет удерживать значения аксиального офсета от больших по модулю отрицательных значений. Ниже 50% извлечения 11-я и 12-я группы быстро погружаются до НУГ (нижняя установленная граница) с максимально допустимой скоростью.

*Второй алгоритм.* 12-я группа быстро погружается до НУГ с максимально допустимой скоростью. Затем погружается 11-я группа до нижней установленной алгоритмом границы. Группы погружаются в режиме индивидуального движения без ПД. При этом происходит выход аксиального офсета за нижнюю границу разрешенного коридора по офсетно-мощностной диаграмме в течение интервала времени порядка 1 – 3 мин, что разрешено техническим регламентом.

*Третий алгоритм.* Алгоритм управления на базе офсетно-мощностной диаграммы по данным СВРК. 12-я группа быстро погружается до нижней заранее определенной границы с максимально допустимой скоростью. Затем погружается 11-я группа до нижней установленной алгоритмом границы. Группы погружаются в режиме индивидуального движения без ПД. В этом случае достигаются большие по модулю отрицательные значения аксиального офсета до –35%, выходящие за пределы офсетного коридора по штатной методике. При этом гораздо легче управлять аксиальным офсетом управляющими группами, так как действия АРМ совпадают в ночном режиме с действиями по удержанию нужного значения офсета мощности. К сожалению, такой алгоритм может использоваться не часто, а только в разовых случаях из-за опасности усталостных накоплений в оболочке топлива при длительных больших циклических нагрузках на топливный элемент.

Независимо от стратегии движения ОР СУЗ при разгрузке энергоблока и в течение всего ночного режима основные принципы минимизации водообмена остаются одними и теми же. Суть их детально описана при разборе способов минимизации базового функционала на каждом временном интервале суточного цикла и их соотношении с реальной технологией эксплуатации РУ с ВВЭР-1200.

Рассмотрим переход с номинальной на 50% мощности и поддержание этого значения в течение ночного интервала времени около 5 – 6 ч (рис. 3). Уменьшение электрической нагрузки на 50% происходит при отключении АРМ и работе ЭЧСР в режиме «РД-1». Во время разгрузки энергоблока при погружении управляющих групп до установленных значений с помощью изменения уставки по давлению с текущего значения до верхней границы (для ВВЭР-1000 – 6,04 МПа и для ВВЭР-1200 – 7,00 МПа) увеличивается максимально давление во втором контуре и тем самым ускоряется разгруз-

ка энергоблока, сокращая при этом водообмен. При достижении электрической мощности нужного значения (50%) включается в работу система регулирования мощности турбогенератора (ЭЧСР в режиме «РМ») с уставкой по мощности 50%.

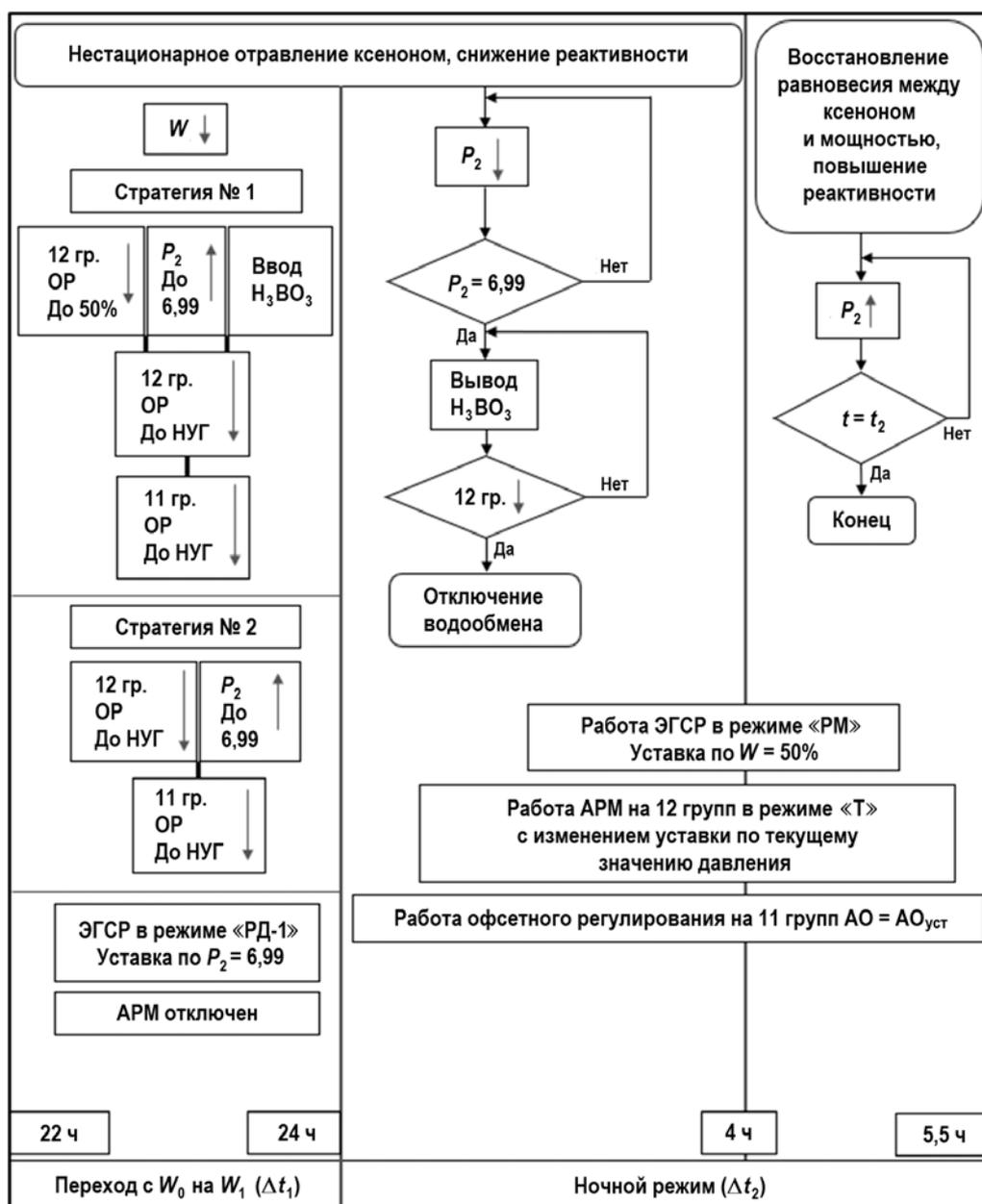


Рис. 3. Алгоритм управления реактором в ночном интервале времени для реализации суточного маневренного режима при минимизации водообмена

Работа АРМ с 12-ой группой происходит в режиме «Т» с изменением уставки по текущему значению давления до нижнего разрешенного значения. При поддержании электрической мощности в ночном интервале времени открываются клапаны перед турбиной и увеличивается расход пара. Давление во втором контуре снижается и уменьшается температура теплоносителя на входе в реактор в первом контуре, что частично компенсирует нестационарное отравление зоны ксеноном. Такой

режим возможен до снижения давления второго контура до определенной границы, определяемой ограничениями по рабочему диапазону давлений во втором контуре. Этот диапазон для ВВЭР-1000 равен 0,43 МПа (от 6,03 до 5,60 МПа) и для ВВЭР-1200 – примерно такой же величине – от 7,00 до 6,6 МПа. При достижении указанной границы по давлению подключается ввод дистиллята до тех пор, пока АРМ не начнет погружать 12-ю группу ОР СУЗ. Это происходит после завершения процесса отравления зоны ксеноном и перехода к равновесию между йодом, ксеноном и нейтронной мощностью (примерно, после шести часов с начала разгрузки энергоблока). Переход приводит к небольшому увеличению реактивности и увеличению нейтронной мощности. При этом клапаны перед турбиной прикрываются для сохранения постоянной электрической мощности и давление второго контура возрастает. Это действие замедлит увеличение мощности в первом контуре при сохранении постоянной электрической мощности до самого конца ночного интервала суточного режима. При работе реактора в ночном режиме АРМ подключен на рабочую группу. Другая управляющая группа удерживает значение аксиального офсета вблизи нижней границы офсетно-мощностной диаграммы для данной мощности.

Рассмотрим теперь вывод энергоблока на номинальную мощность и процесс поддержания номинальной электрической мощности в дневном интервале времени (рис. 4).

При выводе реактора на номинальную мощность АРМ отключен, ЭЧСР установлен в режим «РД-1», 11-я и 12-я группы извлекаются до верхней установленной границы (ВУГ).

После извлечения групп снижают уставку ЭЧСР по давлению второго контура в режиме «РД-1» до определенной границы, равной для серийного ВВЭР-1000 5,65 МПа, а для ВВЭР-1200 – 6,65 МПа. Это ускоряет выход реактора на номинальную мощность за счет температурного эффекта реактивности, после чего, если мощность меньше 89%  $W_0$ , используется ввод дистиллята. Далее извлекаются 11-я группа до ВКВ и 12-я группа до верхней разрешенной границы (ВРГ). ВРГ 12-й группы определяется значением аксиального офсета, не превышающим средней величины между верхней и нижней границами офсетно-мощностной диаграммы при 100%-ой мощности. После выхода на номинальную мощность ЭЧСР переводится в режим «РМ», а АРМ работает на 12-ой группе в режиме «Т» с изменением уставки по текущему значению давления. Поскольку идет выжигание ксенона и продолжается увеличение нейтронной мощности, клапаны перед турбиной прикрываются для сохранения постоянной электрической мощности и давление второго контура возрастает, что несколько замедляет повышение нейтронной мощности в первом контуре. Повышение давления происходит до верхней разрешенной границы с непрерывным переписыванием уставки по давлению для АРМ в режиме «Т». Как только начнется погружение рабочей группы, и она достигает положения, при котором значение аксиального офсета окажется вблизи нижней границы офсетно-мощностной диаграммы при номинальной мощности, необходимо подключить ввод бора и вводить его так, чтобы группа ОР СУЗ практически не двигалась.

После того, как группа ОР СУЗ начнет извлекаться (это происходит после завершения процесса «выжигания» ксенона и перехода к равновесию между йодом, ксеноном и нейтронной мощностью примерно после шести часов с начала разгрузки энергоблока), нужно отключить водообмен и дожидаться снижения давления второго контура до нижней разрешенной границы. При этом необходимо непрерывно перезаписывать уставку для АРМ на текущее значение давления второго контура и контролировать значение офсета, чтобы оно оставалось между верхней и нижней границами офсетно-мощностной диаграммы. После достижения нижней разрешен-

ной границы давления во втором контуре и при извлечении рабочей группы до положения, при котором возникает опасность выхода офсета за пределы разрешенной области, необходимо задействовать ввод дистиллята.

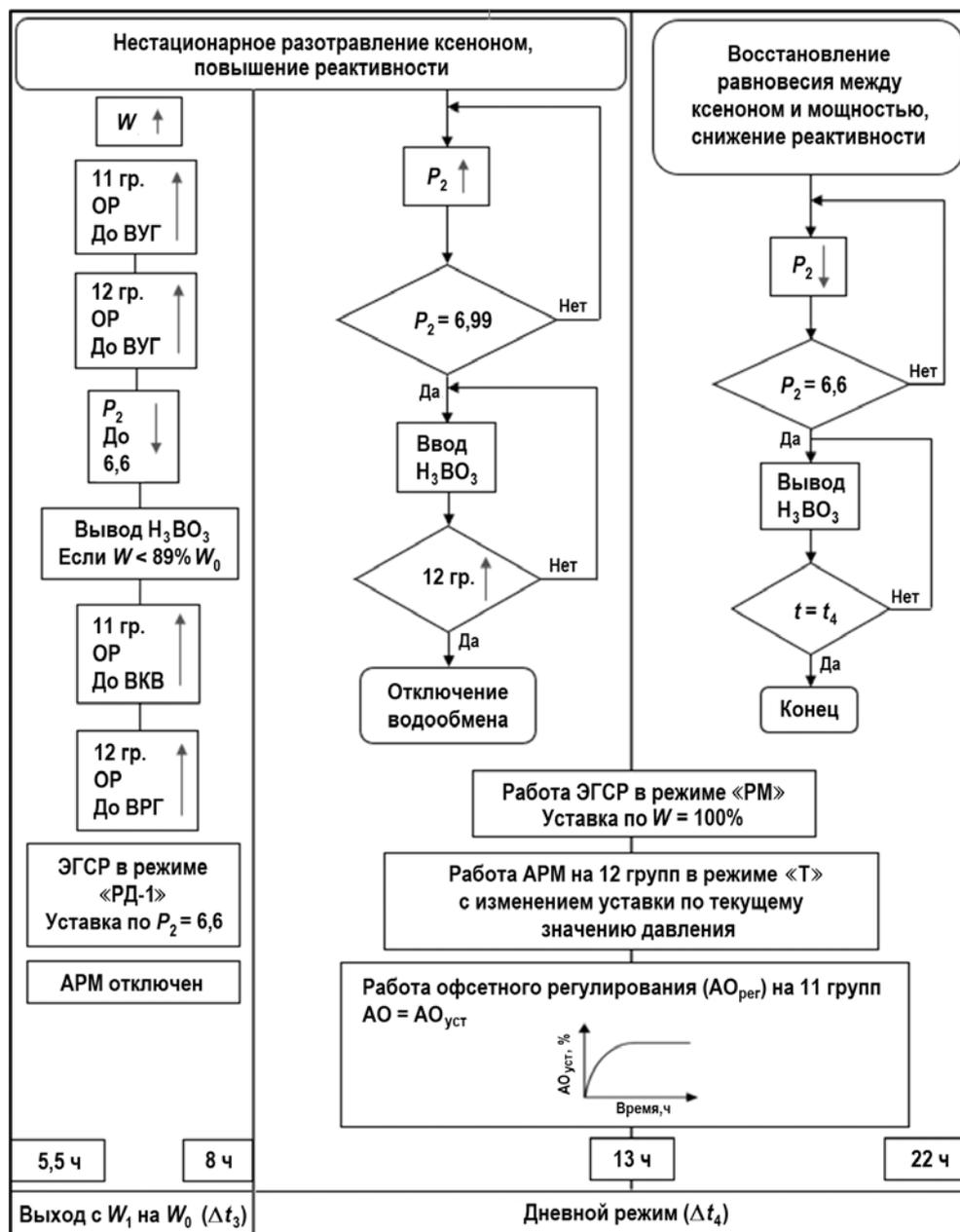


Рис. 4. Алгоритм управления реактором в дневном интервале времени для реализации суточного маневренного режима при минимизации водообмена

Описанные сценарии для суточного маневренного режима изменения нагрузок 100 – 50 – 100%  $W_{ном}$  по существу являются базовыми для любого алгоритма минимизация водообмена при эксплуатации РУ.

Структурные схемы алгоритмов управления реактором, позволяющие реализовать эти сценарии, показаны на рис. 3, 4.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СУТОЧНОГО ГРАФИКА НАГРУЗКИ 100 – 50 – 100%  $W_{ном}$**

Поиск оптимального алгоритма управления нейтронным полем в реакторе при реализации суточного режима проводился на графике изменения тепловых нагрузок 100 – 50 – 100% номинальной мощности для различных моментов кампании стационарной топливной загрузки блока № 1 НВАЭС-2. В качестве базового варианта управления был выбран вариант из материалов НИЦ «КИ» для той же стационарной кампании блока № 1 НВАЭС-2 на момент кампании 300 эфф. суток [7 – 16]. Данный вариант служит отправной точкой для проведения сравнительного анализа различных рассмотренных вариантов управления с использованием ПК ПРОСТОР [17, 18].

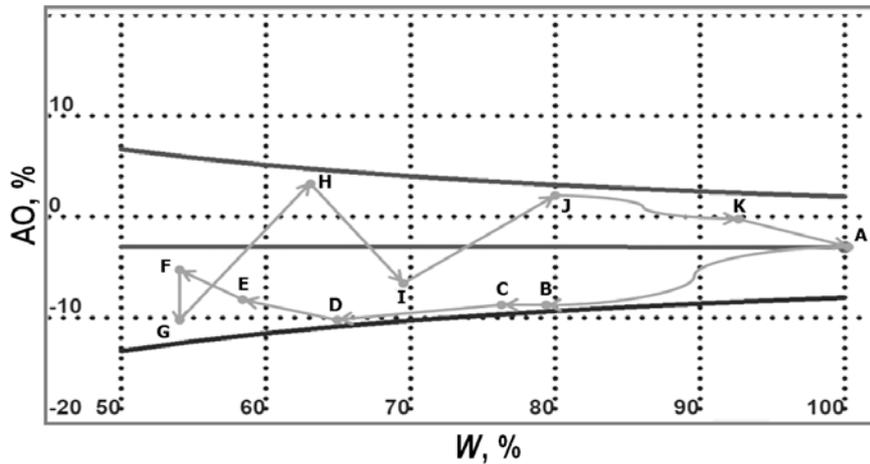


Рис. 5. Офсетно-мощностная диаграмма работы реактора в режиме суточного графика нагрузки 100 – 50 – 100% в интервале одного из установившихся циклов. Алгоритм № 1. Стационарная кампания (320 эфф. сут)

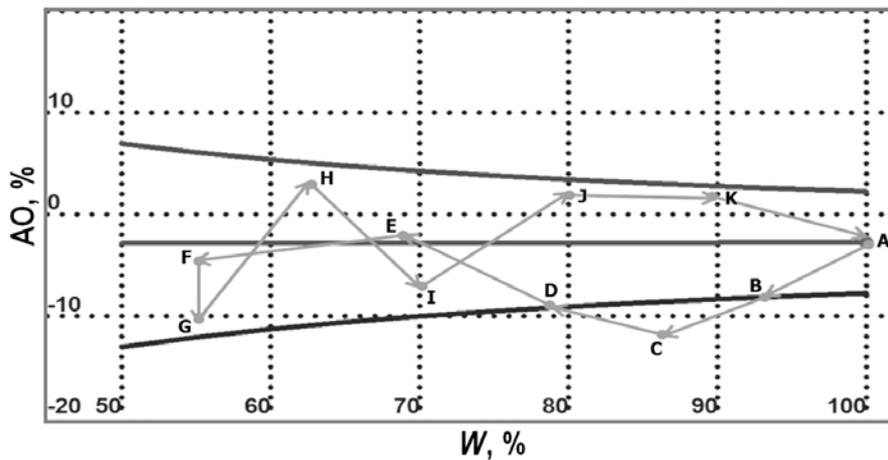


Рис. 6. Офсетно-мощностная диаграмма работы реактора в режиме суточного графика нагрузки 100 – 50 – 100% в интервале одного из установившихся циклов. Алгоритм № 2. Стационарная кампания (320 эфф. сут)

На рисунке 5 представлены результаты расчетного моделирования работы реактора в суточном графике нагрузки 100 – 50 – 100% для восьмой топливной загрузки блока № 1 НВАЭС-2 с применением алгоритма № 1 (320 эфф. сут). При этом происходит удержание фазовой траектории аксиального офсета полностью в пределах разрешенного коридора по штатной методике. Расчеты проводились в течение 10-ти календарных суток.

На рисунке 6 показаны результаты расчетного моделирования работы реактора в суточном графике нагрузки 100 – 50 – 100% для восьмой топливной загрузки блока № 1 НВАЭС-2 с применением алгоритма № 2 (320 эфф. сут). При этом наблюдается выход фазовой траектории аксиального офсета за нижнюю границу разрешенного коридора по штатной методике в течение трех минут. Расчеты проводились в течение 10-ти календарных суток.

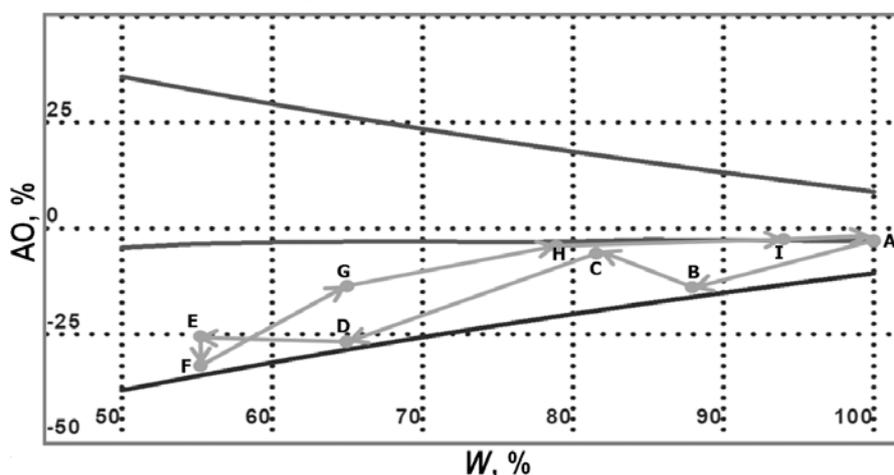


Рис. 7. Оффсетно-мощностная диаграмма работы реактора в режиме суточного графика нагрузки 100 – 50 – 100% в интервале одного из установившихся циклов. Алгоритм № 3. Стационарная кампания (320 эфф. сут)

На рисунке 7 приведены результаты расчетного моделирования работы реактора в суточном графике нагрузки 100 – 50 – 100% для восьмой топливной загрузки блока № 1 НВАЭС-2 с применением алгоритма № 3 (320 эфф. сут). В этом случае фазовая траектория офсета находится вне пределов разрешенного коридора по штатной методике, но в пределах разрешенного коридора по данным СВРК без учета усталостных накоплений. Расчеты проводились в течение 10-ти календарных суток.

Результаты проведенных исследований по трем рассмотренным вариантам алгоритмов движения ОР СУЗ с использованием ПК ПРОСТОР и варианту НИЦ «КИ» по программе ИР показывают следующие затраты по водообмену:

- НИЦ «КИ» – момент кампании 300 эфф. сут – 200 т/сут;
- 1-й вариант – момент кампании 320 эфф. сут – 55 т/сут;
- 2-й вариант – момент кампании 320 эфф. сут – 14,26 т/сут;
- 3-й вариант – момент кампании 320 эфф. сут – 4,63 т/сут.

Проведены расчеты для стационарной 12-месячной топливной загрузки для 10, 90, 170, 245, 320, 335 эфф. суток при реализации суточного режима с маневрированием мощности по графику 100 – 50 – 100% номинальной мощности.

Для каждого момента кампании расчеты проводились в течение 10-ти календарных суток с учетом выгорания топлива. По этим данным были построены зависимости среднесуточных затрат воды в зависимости от выгорания топлива для каждого рассмотренного варианта. Для всех этих моментов кампании были выполнены все требования по безопасной эксплуатации активной зоны при реализации суточного режима 100 – 50 – 100%.

На рисунке 8 дана сравнительная зависимость среднесуточных затрат воды от времени работы топливной загрузки при суточном маневрировании мощностью 100 – 50 – 100% для трех рассмотренных вариантов алгоритма движения ОР СУЗ, найденная с использованием программного комплекса ПРОСТОР. Для сопоставления приводится вариант НИЦ «КИ», рассчитанный по программе ИР.

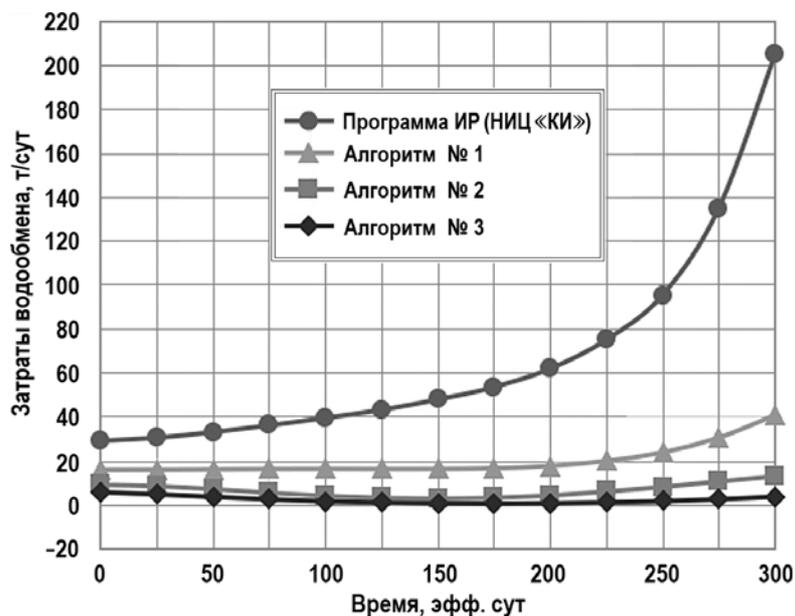


Рис. 8. Зависимость среднесуточных затрат воды от времени работы топливной загрузки в режиме суточного маневрирования мощностью 100 – 50 – 100% для трех рассмотренных вариантов алгоритма движения ОР СУЗ по ПК ПРОСТОР и варианту НИЦ «КИ» по программе ИР

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизация управления суточным режимом с глубоким погружением 12-й группы и температурным регулированием может дать существенную экономию водообмена. При использовании офсетно-мощностной диаграммы по прямым данным СВРК алгоритм управления можно построить гораздо легче, и затраты воды окажутся заметно меньшими, чем в случае использования офсетно-мощностной диаграммы по методике НИЦ «КИ». Однако такой способ регулирования возможен только для разовых случаев.

Результаты проведенных исследований получены на упрощенной расчетной схеме в программном комплексе ПРОСТОР, которая заменяет моделирование физических процессов и работы автоматики во втором контуре заданием внешних данных, поведение которых имитируется как можно ближе к реальной картине. И хотя полученные результаты очень слабым образом зависят от точности проведенного имитирования, необходимо проведение дальнейших исследований оптимальных алгоритмов управления суточным режимом для уточнения их параметров на полномасштабных моделях, включающих в себя модели физических процессов и работы всей автоматики в оборудовании первого и второго контуров РУ с ВВЭР-1200.

## Литература

1. Аверьянова С.П., Вохмянина Н.С., Злобин Д.А., Филимонов П.Е., Кузнецов В.И., Лаговский В.Б. Метод офсетно-мощностной фазовой диаграммы для управления энерговыделением реактора // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121. – № 3. – С. 123-127.
2. Аверьянова С.П., Лукин Г.Л., Проселков В.Н. Контроль локальной линейной мощности твэлов в активной зоне ВВЭР-1000 с помощью офсетно-мощностной диаграммы // Атомная энергия. – 2002. – Т. 93. № 1. – С. 13-18.
3. Филимонов П.Е. Управление энергораспределением ВВЭР с помощью офсет-офсетной диаграммы // Атомная энергия. – 1992. – Т. 73. – № 3. – С. 175-179.
4. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Филимонов П.Е. Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000 // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109. – № 6. – С. 198-202.

5. Беденко С. В., Нестеров В. Н., Шаманин И. В. Основы управления нейтронным полем в ядерном реакторе. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 176 с.
6. Игнатенко Е.И., Пыткин Ю.Н. Маневренность реакторов типа ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 88 с.
7. Косоуров К.Б., Паплов В.И., Аверьянова С.П., Алешин С.С. Разработка технического проекта РУ АЭС-2006. / Отчет о научно-исследовательской работе НИЦ «Курчатовский институт». Инв. № 32/1-79-310. – М.: НИЦ «КИ», 2010. – С. 324-378.
8. Аверьянова С.П., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е., Хайтао Лю, Йоу Ли. Испытание усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением ВВЭР-1000 в условиях маневренных режимов на Тяньваньской АЭС (Китай) // Атомная энергия. – 2007. – Т. 103. – № 5. – С. 277-282.
9. Аверьянова С.П., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е., Горохов А.К., Молчанов В.Л., Коренной А.А., Макеев В.П. Внедрение усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением активной зоны ВВЭР-1000 на Хмельницкой АЭС // Атомная энергия. – 2005. – Т. 98. – № 6. – С. 414-421.
10. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К. Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е. Работа ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – № 5. – С. 247-252.
11. Поваров В. П., Лебедев О. В., Макеев В. В. Предупреждение и подавление аксиальных ксеноновых колебаний в активной зоне ВВЭР-1000 // Теплоэнергетика. – 2003. – Т. 5. – С. 11-15.
12. Филимонов П.Е., Крайнов Ю.А. Подавление аксиальных колебаний энергораспределения ВВЭР-1000 без органов регулирования половинной длины // Атомная энергия. – 1995. – Т. 78. – № 5. – С. 388-589.
13. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Поддержание равновесного офсета – эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000 // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90. – № 3. – С. 231-233.
14. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П., Олейник С.Г. Испытания маневренности ВВЭР-1000 на V блоке Запорожской АЭС // Атомная энергия. – 1998. – Т. 85. – № 5. – С. 364-367.
15. Максимов М.В., Беглов К.В., Каназирский Н.Ф. Управление аксиальным офсетом ядерного реактора при маневрировании мощностью. // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2015. – Т. 7. – № 1. – С. 54-61.
16. Никольский М. В. Аксиальный офсет как мера устойчивости легководного ядерного реактора при суточном маневре мощностью. // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2014. – Т. 6. – № 4. – С. 65-72.
17. Семенов А. А., Выговский С. Б., Чернаков В. А и др. Опыт использования программного комплекса ПРОСТОР и перспективы его дальнейшего применения. // Сборник трудов научной сессии МИФИ. – 2004. – С. 82-83.
18. Выговский С.Б., Зимин В.Г. Чернов Е.В. Приложение к аттестационному паспорту №182 от 28.10.2004г. Программный комплекс ПРОСТОР (версия 1). – М.: НИЯУ МИФИ, 2004. – 8с.

Поступила в редакцию 03.07.2018 г.

#### Авторы

Выговский Сергей Борисович, доцент  
E-mail: vigovskii@mail.ru

Аль Малкави Рашдан Талал, аспирант  
E-mail: rashdanmalkawi@gmail.com

Хачатрян Арцрун Гагикович, магистр  
E-mail: artsrun-khachatryan@mail.ru

## **A RESEARCH OF VVER-1200 REACTOR CORE CONTROL ALGORITHMS FOR IMPLEMENTATION OF FLEXIBLE (LOAD TRACING) OPERATING MODES**

Vygovskiy S.B., Al Malkawi R.T., Khachatryan A.G.

NRNU MEPhI

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

### ABSTRACT

Results of numerical studies of algorithms for controlling spatial distribution of neutron field in VVER-1200 reactor core operated inflexible daily reactor load adjustment modes are provided in the present paper. Possibility was demonstrated of automated control of axial offset of neutron power using one of the control groups for the purpose of removing the psychological stress on operational personnel of nuclear power plants in flexible reactor power load adjustment regimes. This allows as well additionally minimizing water exchange while retaining all nuclear safety parameters in the reactor core. Research was carried out using the PROSTOR software complex currently applied by the Novovoronezh NPP training center for conducting training sessions in optimal control algorithms for power unit operation in maneuvering modes for operational personnel of nuclear power plants. The methodology is suggested for adjustment of parameters of offset control depending on the neutronic characteristics of the reactor core. The expediency of the conducted study is explained by the fact that testing maneuvering daily NPP operating modes with reactor power load varying within wide range is planned under the NPP-2006 project to be conducted in Russia on the Novovoronezh NPP-2 and Leningrad NPP-2 power units. Implementation of such testing is necessary for verification of operability of power units in maneuvering daily modes for a number of contracts with foreign partners concluded by the RF and for enhancing competitiveness of VVER NPP equipment abroad.

**Key words:** VVER-1200, offset-power phase diagram, axial offset (AO), automated power controller (APC), control algorithm, water exchange.

### REFERENCES

1. Aver'yanova S.P., Vohmyanina N.S., Zlobin D.A., Filimonov P.E., Kuznecov V.I., Lagovskij V.B. Offset-Power Phase Diagram Method to Control the Energy Release of the Reactor. *Atomnaya Energiya*. 2016, v. 121, no. 3, pp. 123-127 (in Russian).
2. Aver'yanova S.P., Lunin G.L., Proselkov V.N. Control of Local Linear Power of Fuel Rods in the VVER-1000 Core Using Offset Power Diagram. *Atomnaya Energiya*. 2002, v. 93, no. 1, pp. 13-18 (in Russian).
3. Filimonov P.E. VVER Power Distribution Control Using Offset-Offset Diagram. *Atomnaya Energiya*. 1992, v. 73, no. 3, pp. 175-179 (in Russian).
4. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Filimonov P.E. Temperature Regulation and Maneuverability of VVER-1000]. *Atomnaya Energiya*. 2010, v. 109, no. 6, pp. 198-202 (in Russian).
5. Bedenko S. V., Nesterov V. N., SHamanin I. V. *Basics of Neutron Field Control in Nuclear Reactors*. Tomsk. TPU Publ., 2009, 176 p. (in Russian).
6. Ignatenko E.I., Pytkin YU.N. *The Maneuverability of the VVER Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1985, 88 p. (in Russian).
7. Kosourov K.B., Paplov V.I., Aver'yanova S.P., Aleshin S.S. Development of the Technical

Project of NPP-2006. *Scientific Report*. Inv. No 32/1-79-310. Moscow. NIC «Kurchatovskij institut» Publ., 2010, pp. 324-378 (in Russian).

8. Aver'yanova S.P., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E., Hajtao Lyu, Jou Li. Testing of Advanced Algorithms for Controlling the Energy Release of VVER-1000 in conditions of maneuvering regimes at Tianwan NPP (China). *Atomnaya Energiya*. 2007, v. 103, no. 5, pp. 277-282 (in Russian).

9. Aver'yanova S.P., Semchenkov Yu. M., Filimonov P.E., Gorohov A.K., Molchanov V.L., Korenoj A.A., Makeev V.P. The Adoption of Improved Algorithms for Controlling the Power Release in the VVER-1000 Core at Khmel'nitskaya NPP. *Atomnaya Energiya*. 2005, v. 98, no. 6, pp. 414-421 (in Russian).

10. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. VVER-1200/1300 Operation in a Daily Load Schedule. *Atomnaya Energiya*. 2012, v. 113, no. 5, pp. 247-252 (in Russian).

11. Povarov V.P., Lebedev O.V., Makeev V.V. Prevention and Suppression of Axial Xenon Oscillations in the VVER-1000 Core. *Teploenergetika*. 2003, v. 5, pp. 11-15 (in Russian).

12. Filimonov P.E., Krajnov Yu.A. Suppressing Axial Oscillations of the Energy Distribution in a VVER-1000 Reactor Without Half-Length Control Rods. *Atomnaya Energiya*. 1995, v. 78, no. 5, pp. 388-589 (in Russian).

13. Filimonov P.E., Aver'yanova S.P. Maintaining an Equilibrium Offset as an Effective Method for Suppressing Xenon Oscillations in VVER-1000. *Atomnaya Energiya*. 2001, v. 90, no. 3, pp. 231-233 (in Russian).

14. Filimonov P.E., Aver'yanova S.P., Olejnik S.G. Tests of VVER-1000 Maneuverability on the Fifth Unit of the Zaporozh'e Nuclear Power Plant. *Atomnaya Energiya*. 1998, v. 85, no. 5, pp. 364-367 (in Russian).

15. Maksimov M.V., Beglov K.V., Kanazirskij N.F. Control of the Axial Offset in a Nuclear Reactor in the Condition of Maneuvering Regimes. *Avtomatizaciya tekhnologicheskikh i biznes-processov*. 2015, v. 7, no. 1, pp. 54-61 (in Russian).

16. Nikol'skij M.V. Axial Offset as Measure of Stability of Light Water Nuclear Reactor in the Condition of Maneuvering Regimes. *Avtomatizaciya tekhnologicheskikh i biznes-processov*. 2014, v. 6, no. 4, pp. 65-72 (in Russian).

17. Semenov A.A., Vygovskij S.B., Chernakov V.A. Experience in Using the Software Complex PROSTOR and the Prospects of its Further Application. *Sbornik trudov nauchnoj sessii MIFI*. 2004, pp. 82-83 (in Russian).

18. Vygovskij S.B., Zimin V.G. Chernov E.V. *Application to the Attestation Manual of the Program Complex PROSTOR (ver. 1)*. No 182 from Oct 28, 2004. Moscow. NIYaU MIFI Publ., 2004. 8p. (in Russian).

#### Authors

Vygovskiy Sergey Borisovich, Associate Professor

E-mail: vigovskii@mail.ru

AL Malkawi Rashdan Talal, PhD Student

E-mail: rashdanmalkawi@gmail.com

Khachatryan Artsrun Gagikovich, Magister

E-mail: artsrn-khachatryan@mail.ru