

- развития высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем. — Атомная энергия, 2005 т. 99, вып. 5, с. 358—365.
3. **Богоявленский Р.Г.** Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978.

4. **Горбис Э.Р., Календерьян В.А.** Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями. М.: Энергия, 1975.
5. **Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.** Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990.

Поступила в Редакцию 18.06.07

УДК 621.039.564.5

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ФОНОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ ГЦК ВВЭР-1000

*Морозов С.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А., Дворников П.А., Швецов Д.М., Кудряев А.А.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского), Белоусов П.А. (Обнинский гос. техн. ун-т
атомной энергетики)*

Акустический шум, генерируемый при течении жидкости под высоким давлением, несет информацию о разгерметизации циркуляционных контуров ВВЭР. Базирующиеся на этом эффекте акустические методы диагностики имеют два важных преимущества: они являются быстродействующими и в принципе позволяют оценить размер и координаты течи.

Возможны два способа реализации акустического метода — контактный, когда информационным признаком является интенсивность (спектральный состав) волн напряжения на поверхности трубопроводов и корпусов оборудования, генерируемых истекающей парожидкостной средой, и чисто акустический, связанный с регистрацией низкочастотных волн акустического давления в воздушной среде вблизи контролируемого оборудования. В силу некоторых причин на АЭС с ВВЭР получил распространение контактный акустический метод.

Особенностью реакторной установки как источника акустических шумов является сложность протекающих в ней процессов с множеством трудно учитываемых связей — это процессы механические, гидродинамические, вибрационные, ударные, связанные с генерацией и барботажем пара, и др. Все это порождает множество акустических источников, которые тем образом, сигналы 53 акустических датчиков дают достаточно полную информацию о работе реакторной установки. Заметим, что датчики GT-400 являются узкополосными, их наивысшая чувствительность лежит в диапазоне 70—250 кГц.

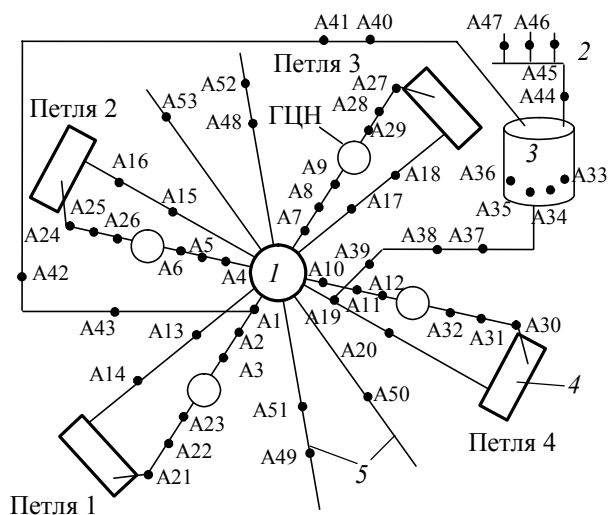
действуют в различных диапазонах частот, зависящих от режима работы установки, состава оборудования и других факторов. Естественно, без изучения характеристик этих шумов, выявления их основных источников нельзя надеяться на обнаружение протечек теплоносителя.

В публикациях, посвященных диагностированию разгерметизации контуров АЭС, фоновым акустическим шумам не уделялось должного внимания. Поэтому настоящая статья заинтересует специалистов, работающих в области акустического течеискания.

В 2005 г. на 3-м блоке Калининской АЭС с ВВЭР-1000 была сдана в опытную эксплуатацию акустическая система контроля течей теплоносителя 1-го контура САКТ [1]. На каждой из четырех петель теплообмена установлено по восемь контактных акустических датчиков волноводного типа GT-400 [2] (по три на участках реактор—ГЦН и ГЦН—парогенератор, по два — на участках реактор—парогенератор). По четыре таких же датчика размещено на корпусе компенсатора давления и трубопроводе впрыска, три датчика — на соединительном трубопроводе компенсатора давления, четыре датчика установлены на трубопроводе сброса и импульсных предохранительных клапанах, шесть — на трубопроводах САОЗ (рис. 1). Та-

Мерой интенсивности акустического шума является усредненный за 1 с среднеквадратичный сигнал датчика, который регистрирует и обрабатывает САКТ. Собственные шумы измерительных каналов составляют 1 мкВ.

В настоящей статье на качественном уровне рассматриваются взаимосвязи и интенсивность



Р и с. 1. Расположение акустических датчиков на трубопроводах и оборудовании ВВЭР-1000 3-го блока Калининской АЭС: 1 — реактор; 2 — импульсное предохранительное устройство; 3 — компенсатор давления; 4 — парогенератор; 5 — трубопроводы системы аварийного охлаждения зоны

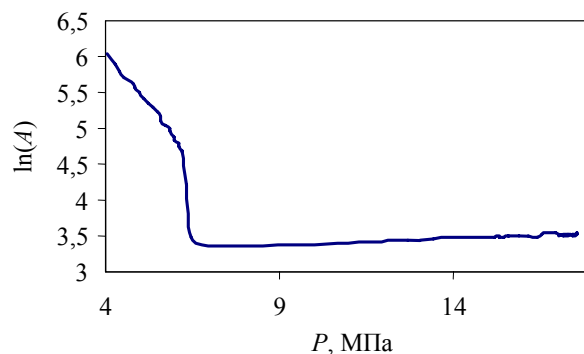
шумов, их зависимость от режима работы установки.

Фоновые акустические шумы в переходных режимах. Эксплуатационный цикл энергоблока с ВВЭР-1000 включает 10 этапов — от перегрузки топлива и уплотнения контура до перевода установки в состояние «останов для ремонта». Очевидно, что изучать источники акустических шумов целесообразно с момента герметизации контура и повышения в нем давления. Повышение давления до 3,5 МПа начинается с реализации холодного состояния — контур не разогрет, мощность отсутствует, основное оборудование в работу не введено. Для этого состояния характерно отсутствие фоновых шумов. При переводе установки в горячее состояние с поэтапным включением основных и вспомогательных систем, обеспечивающих циркуляцию теплоносителя, шумовые акустические процессы значительно возрастают. Рассмотрим характер фоновых шумов в главном циркуляционном контуре (ГЦК) в режимах, предшествующих энергетическому.

В переходных режимах сложно идентифицировать физическую природу шумов, поскольку

ку режимные параметры установки непостоянны и зачастую неизвестны состав и последовательность введения в работу основного и вспомогательного оборудования. Тем не менее совокупный анализ экспериментальных данных об интенсивности шумов и изменениях технологических параметров позволил выделить один из основных и наиболее мощных фоновых источников, связанный с наличием свободного газа в теплоносителе. Эффект шумообразования в движущейся жидкости при наличии в ней распределенных пузырьков газа хорошо известен [3]. Он возникает за счет осцилляций объема пузырьков под действием случайных колебаний давления в жидкости. Очевидно, что его интенсивность должна быть связана с объемным содержанием газа в теплоносителе. Согласно данным [4] дисперсия шума от подобных источников пропорциональна объемному расходу газа. Из главных факторов, воздействующих на содержание свободного газа, следует отметить статическое давление, температуру, наличие турбулентности, а также общее газосодержание жидкости [5, 6].

Анализ данных в режимах с изменением давления в первом контуре показал, что давление оказывается определяющим (рис. 2). Датчик расположен на участке ГЦН—реактор работающей петли. Давление изменялось в пределах от 2 до 17 МПа, при этом температура в контуре поддерживалась в интервале 130—150 °С. На рис. 2 можно видеть два характерных участка: в первом — резкое уменьшение интенсивности шумов при повышении давления до 8 МПа, во втором — незначительное увеличение при росте давления с 8 до 17 МПа. Следует обратить внимание на изменение знака барометрического эффекта шума на втором участке и его незначительную величину.

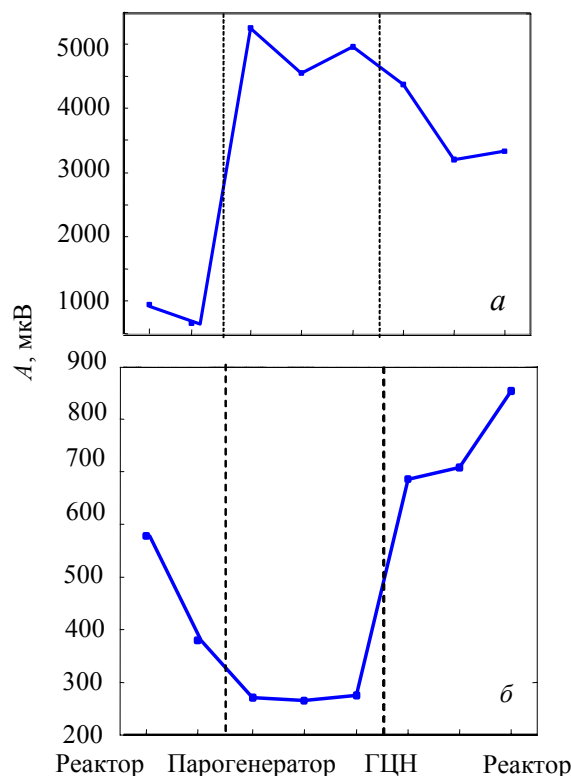


Р и с. 2. Зависимость логарифма интенсивности акустического сигнала от давления

Качественно это можно объяснить следующим образом. При низком давлении количество пузырьков газа в теплоносителе значительно, и при движении они генерируют интенсивный шум. С повышением давления растворимость газа увеличивается [6], что приводит к уменьшению концентрации свободного газа в виде пузырьков. Это в свою очередь ведет к снижению интенсивности шума. Однако при дальнейшем росте давления начинают работать другие механизмы, приводящие к малому положительному барометрическому эффекту. Во-первых, возрастает коэффициент упругости газожидкостного теплоносителя, в результате чего снижается затухание акустических колебаний. Во-вторых, с уменьшением объемного газосодержания в теплоносителе возрастают скорость распространения акустических колебаний и его акустический импеданс. Следовательно, улучшаются условия для передачи колебаний от теплоносителя к стенке трубопровода.

Следует отметить, что гигантские фоновые шумы, достигающие в некоторых режимах нескольких тысяч микровольт, отмечаются только при низком давлении в первом контуре (до 3—5 МПа) и только в петлях с введенными в работу ГЦН (рис. 3). Наибольшая интенсивность шума наблюдается в работающих петлях. В то же время в петлях с неработающими ГЦН шумы в несколько раз ниже. Следует отметить характерное распределение интенсивности акустического шума в петле с отключенным ГЦН. Шум распространяется от реактора с обоих концов петли, уменьшаясь к участку парогенератор—ГЦН. В неработающих петлях, как следует из показаний датчиков перепада давления на ГЦН, существует движение теплоносителя (противоток), что способствует более или менее равномерному распределению пузырьков газа. По-видимому, акустический сигнал датчиков в неработающих петлях складывается из шума, обусловленного колебаниями пузырьков в самой петле, и шума работающих петель, передаваемого через корпус реактора.

Пространственное распределение фоновых шумов. Результаты одновременных измерений сигналов всех датчиков демонстрируют заметную пространственную зависимость распределения фоновых шумов. Прежде всего необходимо отметить, что во всех режимах эксплуатации реакторной установки наибольший акустический шум регистрируется на трубопро-



Р и с. 3. Среднее распределение акустических шумов в петлях с введенным в работу (а) и отключенным ГЦН (б) (в работе два ГЦН, давление теплоносителя 2,04 МПа, температура 77 °С)

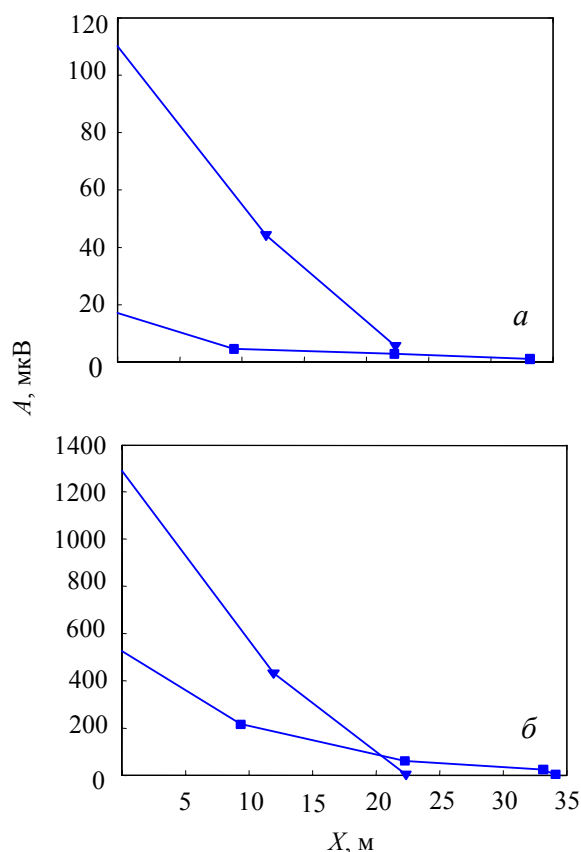
водах ГЦК. На рис. 4 видно, что интенсивность акустического шума уменьшается по мере удаления от него. Таким образом, можно выделить несколько участков с резко отличающимися шумовыми характеристиками:

трубопроводы ГЦК — наиболее шумящая область;

корпус компенсатора давления, несмотря на постоянно включенные в работу тэны, оказался низкошумящим в режиме работы на номинальных параметрах (уровень фоновых сигналов на нем составлял единицы микровольт и, главное, был почти неизменным);

активная часть САОЗ — сигналы датчиков по форме идентичны сигналам датчиков, установленных на трубопроводах ГЦК, но имеют значительно меньшую интенсивность, что позволяет говорить об отсутствии источников шума в этой области;

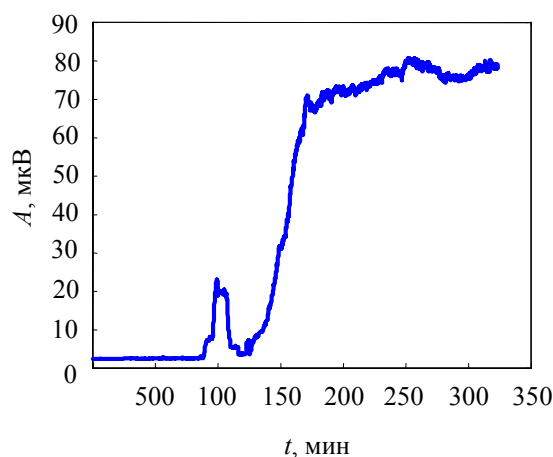
трубопровод сброса компенсатора давления и импульсные предохранительные устройства — акустически эта область не связана с ГЦК, фоновые шумы здесь минимальны и не превышают нескольких микровольт при отсутствии протечек в клапанах.



Р и с. 4. Распределение акустического шума в зависимости от удаленности от ГЦК в энергетическом (а) и переходном режиме (б): по тракту соединительного трубопровода (■) и трубопровода впрыска (▼)

Низкий уровень шума в области импульсных предохранительных устройств компенсатора давления во всех режимах эксплуатации реакторной установки позволяет регистрировать протечки в них без применения специальных алгоритмов фильтрации фона (рис. 5). Определить интенсивность течи клапана имеющимися на Калининской АЭС средствами невозможно, однако анализ неорганизованных протечек первого контура позволяет утверждать, что протечка не превышала 2,5 л/мин.

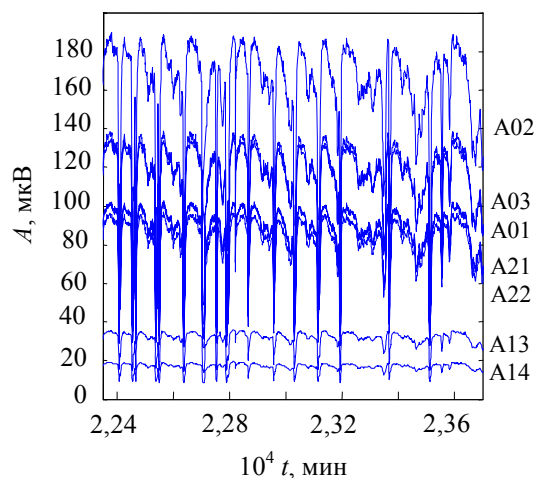
Фоновые шумы в энергетическом режиме блока. Режим работы на мощности является наиболее длительным и наиболее значимым с точки зрения диагностирования течи. Поэтому идентификация источников шумов в этом режиме чрезвычайно актуальна. Нужно отметить, что уровень шумовых сигналов датчиков в энергетическом режиме существенно ниже, чем в переходных, хотя на полную мощность работают парогенераторы и в действие введены вспомогательные системы ГЦК. Так, если в переходных режимах сигналы в отдельных случаях могут достигать $(5-6) \cdot 10^3$ мкВ, то при работе на мощ-



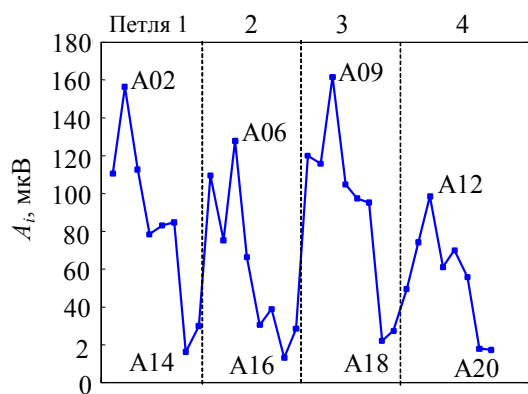
Р и с. 5. Сигнал акустического датчика, установленного на импульсном предохранительном устройстве, при возникновении протечки клапана

ности они измеряются максимально несколькими сотнями микровольт. Причем в определенных режимах максимальный уровень шумов снижается до 30—50 мкВ. Если учесть, что сигнал течи 2—3 л/мин составляет 150—200 мкВ, то информативного приращения в этом режиме достаточно для его обнаружения.

Особенностью фоновых шумов в энергетическом режиме является их существенная нестационарность. Типичный вид сигналов приведен на рис. 6. Характерными для них являются квазипериодические почти синхронные изменения интенсивности шумов во всех петлях ГЦК. Следует также обратить внимание на характер распределения интенсивности шумов по петлям ГЦК при четырех работающих ГЦН (рис. 7). Диаграмма показывает, что распределение интенсивности по петлям идентично — в каждой петле существует максимум на участке ГЦН—реактор, на участке парогенератор—ГЦН рас-



Р и с. 6. Интенсивности акустических сигналов датчиков во времени



Р и с. 7. Распределение интенсивности акустического шума по ГЦК (энергетический режим)

пределение шума приблизительно равномерное, участок реактор—парогенератор — наиболее малозумящий. Подобие вида распределений вызывает естественный вопрос — не обусловлено ли оно общей причиной, а если это так, то как интенсивность сигналов разных датчиков связана между собой? Анализ показал, что коэффициенты корреляции между показаниями любой пары сигналов не снижаются ниже 0,9. Столь высокая взаимосвязь сигналов акустических датчиков и синхронность их изменения во времени предполагают возможность существования двух типов источников фонового акустического шума в трубопроводах ГЦК.

Во-первых, это может быть шум, обусловленный общим для всех петель параметром, как это имело место в переходном режиме с изменением давления. Однако взаимный корреляционный анализ акустических сигналов и флуктуаций возможных параметров, влияющих на шум, — давления в первом контуре, температуры теплоносителя на входе и выходе из каждой петли, расхода теплоносителя по петлям и даже мощности реактора дал отрицательный результат.

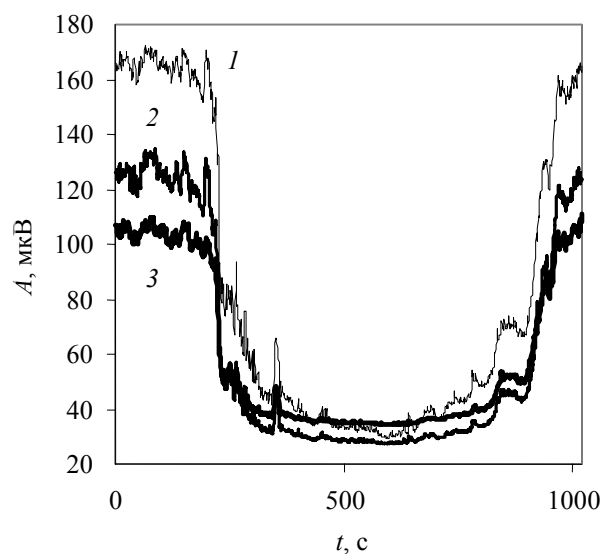
Во-вторых, мог реализоваться вариант генерации акустического шума с наблюдаемыми пространственно-временными характеристиками, если бы акустические шумы проникали одновременно во все четыре петли ГЦК от общего внеконтурного источника. Причем областью проникновения должны быть в этом случае холодные трубопроводы между ГЦН и входными патрубками корпуса ядерного реактора. На это указывает наличие максимумов распределения интенсивности шумов по холодным трубопроводам петель (см. рис. 7). Заметим, что именно в эти трубопроводы в месте установки датчиков, показывающих максимальную интенсивность

шумов, подводятся трубопроводы системы подпитки—продувки теплоносителя первого контура, одной из функций которой является очистка теплоносителя от газовых примесей с помощью деаэратора.

Анализ временных показаний акустических каналов и технологических параметров системы подпитки—продувки выявил, что квазипериодические изменения интенсивности шумов связаны с режимом работы деаэратора. На рис. 8 приведены показания датчиков, размещенных на холодных участках трубопроводов петель в позициях с максимальной интенсивностью, во время вывода деаэратора из парового режима. Необходимо отметить, что сигналы получены при неизменных технологических параметрах ГЦК, изменялся лишь режим работы деаэратора.

По-видимому, барботажный процесс при деаэрации теплоносителя является интенсивным источником акустического шума с широким частотным спектром. Генерируемая мощность шума такова, что даже значительное затухание при его распространении по трубопроводам подпитки до холодных трубопроводов ГЦК не может подавить этот фоновый эффект.

Заключение. Впервые получены подробные пространственно-временные характеристики интенсивности фоновых акустических шумов по петлям главного циркуляционного контура и вспомогательным трубопроводам АЭС с ВВЭР-1000. Показано, что интенсивность фоновых шумов зависит от режима работы установок. На основе анализа данных сделаны выводы о



Р и с. 8. Изменение интенсивности акустических шумов при выводе деаэратора из парового режима: 1 — А9; 2 — А3; 3 — А6

возможных источниках этих шумов. В пусковых режимах с пониженным давлением в первом контуре (до 5—8 МПа) основным источником является нерастворенный газ в циркулирующем теплоносителе. Интенсивность источника зависит от газосодержания в теплоносителе и давления в первом контуре. При рабочем давлении (~16 МПа) он снижается до 20—30 мкВ. В энергетических режимах преобладающим является внешний по отношению к главному циркуляционному контуру источник, который проявляется когерентно во всех четырех петлях первого контура. Вероятнее всего, он связан с процессами в деаэраторе системы продувки—подпитки. Генерируемый при этом шум по трубопроводам системы проникает в петли ГЦК на участках ГЦН—реактор. Отличительной и благоприятной для решения диагностических задач особенностью фонового шума является его высокая коррелированность. На основе этого эффекта можно реализовать различные алгоритмы фильтрации с доведением остаточного вклада фона до единиц микровольт, что позволит уверенно обнаруживать течи теплоносителя интенсивностью менее 1 л/мин. В настоящее время завершаются работы по оптимизации алгоритма фильтрации, который будет введен в программное обеспечение САКТ для 3-го блока Калининской АЭС и других установок.

Другим очевидным использованием высокой коррелированности акустических шумов является процедура оперативной диагностики состояния измерительных каналов (включая датчики), алгоритм которой также находится в стадии завершения и внедрения на действующих системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А. и др. Система акустического контроля течей (САКТ): Препринт ФЭИ-3082, 2006.
2. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Уралец А.Ю. и др. Пьезоэлектрический преобразователь акустической эмиссии. Патент РФ № 2089897. — Бюл. «Изобретения», 1997, № 25, с. 334.
3. Leighton T. The Acoustic Bubble. London: Academic Press, 1997.
4. Балабудкин М.А., Барам А.А., Коган В.Б. Способ контроля расхода газа. Авт. свид. № 216307. — Бюл. «Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1968, № 14, с. 104.
5. Гаврилов Л.Р. Содержание свободного газа в жидкостях и методы его измерения. — В сб.: Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. Т. III. М.: Наука, 1970, с. 395—426.
6. Бараненко М.А., Асмолов В.Г., Киров В.С. Термодинамика и теплообмен в ЯЭУ с газонасыщенным теплоносителем. М.: Энергоатомиздат, 1993.

Поступила в Редакцию 31.01.07

УДК 539.125.5+621.039.519

ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ПОКОЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИБР-2

Пепельшев Ю.Н. (ОИЯИ), Смирнов В.С. (НИКИЭТ)

Среднее время жизни поколения нейтронов в импульсном реакторе ИБР-2 определяет длительность нейтронной вспышки. Физический пуск показал, что его можно уменьшить с 83 до 50—55 нс и тем самым сократить длительность нейтронной вспышки на 20 мкс [1]. В соответствии с этим в конструкцию реактора были внесены изменения. Так, усилили защиту активной зоны от попадания в нее тепловых и резонансных нейтронов, рассеивающихся в кожухе подчетные оценки времени жизни поколения нейтронов точнее могли быть сопоставлены с экспериментальными. Поэтому возникла необходимость в проведении дополнительных экспериментальных исследований. В настоящей ста-

вижного отражателя и основном замедлителе. Существенно изменили и конструкцию подвижного отражателя (дисковый дополнительный с бериллиевым вкладышем заменили на стальной «трезубец»). Кроме того, для проработки дополнительного пути сокращения нейтронного импульса необходимы более подробные экспериментальные данные о влиянии основных элементов конструкции реактора на среднее время жизни поколения нейтронов. В этом случае расте приведены основные экспериментальные и расчетные результаты времени жизни поколения нейтронов для штатного состояния реактора и реактора со стендом ЭПОС-2, на котором изучали нейтронно-физические характеристики раз-