

УДК 621.039.5:621.311.25

Шараевский Г. И., Фиалко Н. М., Шараевский И. Г., Зимин Л. Б.

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины. Украина, г. Киев

АВАРИЙНАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПЕРВОГО КОНТУРА РЕАКТОРОВ ВВЭР

Выполнен анализ особенностей резонансных колебательных процессов в первом контуре реакторов ВВЭР-1000. Рассмотрена расчетная акустическая схема для определения собственных частот колебаний давления двухфазного потока. Приведены типичные спектры пульсаций давления, а также данные о характере разрушений элементов первого контура. На примерах различных нештатных ситуаций рассмотрена вибрационная надежность водо-водяных энергетических реак-

торов. Показана недостаточная надежность применения детерминированных подходов к диагностике текущего технического состояния элементов и систем реакторов ВВЭР. Рассмотрены принципы и перспективы создания систем автоматической компьютерной диагностики на основе анализа спектральных характеристик сигналов штатных датчиков параметров вибрационных и теплогидравлических процессов с целью раннего выявления и предотвращения развития потенциально опасных состояний. [dx.doi.org/10.29010/86.5]

Ключевые слова: реактор ВВЭР-1000; первый контур; двухфазный поток; пульсации давления; собственная частота; элементы конструкции; вибрационное состояние.

1. Актуальность проблемы

В последние годы в связи с необходимостью решения неотложных задач, связанных с актуальной проблематикой обеспечения эксплуатационной надежности высокофорсированных теплообменных устройств, которые нашли широкое применение в некоторых высокотехнологичных приложениях, например, в атомной, ракетной и радиолокационной технике, был выполнен комплекс экспериментальных и теоретических исследований колебательной динамики процесса кипения теплоносителя в парогенерирующих каналах (ПК) указанных устройств в условиях принудительной циркуляции теплоносителя. Основные результаты этих исследований применительно к активным зонам (АкЗ) и первому контуру реакторных установок проанализированы в монографиях [1–3]. Указанные исследования показали, что процесс генерации паровой фазы на теплоотдающей поверхности при определенных условиях сопровождается интенсивными полигармоническими колебаниями динамического давления p_d двухфазного парожидкостного потока в широком диапазоне частот. Было установлено, что амплитуды A_p подобных колебаний давления теплоносителя в кипящем канале могут достигать значений, составляющих 50–100 и более процентов от величины статического давления $p_{ст}$ в ПК. В ряде случаев такие колебания являются непосредственной причиной разрушения теплообменных аппаратов. Комплекс интегральных и спектральных характеристик таких специфических колебательных процессов был всесторонне исследован в указанных работах. Тем не менее, в последнее время термоакустическая колебательная неустойчивость (ТАН) ПК рассматривается специалистами [4] в качестве одного из главных факторов, которые ограничивают дальнейшее форсирование мощности и прогресс в создании эффективных теплообменных устройств. Таким образом, ТАН двухфазных потоков продолжает оставаться одним из наименее изученных видов высокочастотной теплогидравлической неустойчивости ПК высокофорсированных теплообменных аппаратов. Следует отметить, что, помимо ПК современных реакторных

установок (РУ), это потенциально опасное явление характерно также для диапазона рабочих режимов трактов охлаждения камер сгорания мощных жидкостных ракетных двигателей, а также жидкостных систем охлаждения генераторных приборов сверхвысоких частот радиолокационных комплексов дальнего обнаружения.

2. Анализ моделей

На основании выполненного в работах [1–3] системного анализа известных результатов экспериментальных исследований ТАН двухфазных неравновесных парожидкостных потоков можно утверждать, что возникновение термоакустических колебаний (ТАК) в ПК проявляется следующим образом:

1. В условиях роста тепловой нагрузки теплоотдающей поверхности и возникновения в ПК недогретого пузырькового кипения при достижении плотностью теплового потока q некоторого значения $q_{нр}$ (тепловой поток нижней границы ТАН) в некоторых случаях возникают мощные высокочастотные полигармонические колебания давления, амплитуда которых A_p имеет тенденцию к дальнейшему росту. Качественный характер динамики изменения амплитуды ТАК в ПК в условиях возникновения ТАН по данным работ [1–6] изображен на рис. 1, а.

2. Дальнейшее увеличение теплового потока сопровождается нарастанием амплитуды ТАК, которая достигает максимума и затем начинает уменьшаться. При последующем росте q происходит полное исчезновение ТАК, которое соответствует тепловому потоку $q_{вр}$, т.е. верхней границе рассматриваемой неустойчивости, проявляющей себя как автоколебательный процесс.

Необходимо подчеркнуть, что до настоящего времени отсутствует единство мнений относительно физического механизма возникновения и развития ТАН. Следует отметить, что одна из первых попыток объяснения физической природы ТАК [7] объясняла их происхождение возникновением ударных волн, возникающих в условиях деградации паровых пузырей при недогретом кипении теп-

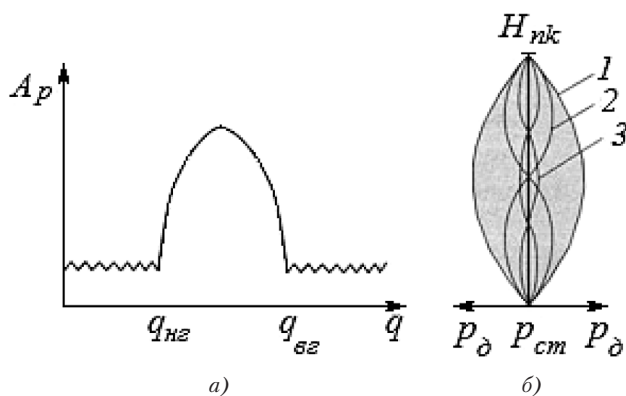


Рис. 1. Динамика развития высокочастотной колебательной неустойчивости в ПК:

- а) – качественный характер области существования ТАН;
- б) – моды стоячих акустических волн в кипящем канале высотой $H_{нк}$ (1, 2, 3 – номера мод колебаний)

лоносителя на поверхности кипения. В то же время, указанная гипотеза не смогла объяснить причины возникновения ТАК, которые проявляют себя в обогреваемом ПК как специфические автоколебания парожидкостного столба, существующие только в определенном интервале паросодержаний двухфазного диабатного потока. Напротив, в работе [5] физический механизм усиления этой неустойчивости в рассматривался исключительно с позиций предложенной ее авторами энергетической модели, которая игнорирует возможный резонансный характер ТАК.

Дальнейшее развитие подхода [7] к анализу механизма ТАН предложено в работах [8, 9]. Согласно физическим представлениям авторов этих работ, двухфазный парожидкостный поток может быть представлен в виде двух колебательных подсистем: 1) подсистемы «А» в виде растущих и деградирующих в двухфазном пристенном слое паровых пузырей; 2) подсистемы «В» как объемного резонатора, функцию которого выполняет парожидкостный объем кипящего теплоносителя в ПК. В соответствии с этим подходе колебания подсистемы «В» являются резонансными волнами давления, частоты которых кратны собственной частоте двухфазного парожидкостного столба в кипящем канале. В соответствии с этой моделью на рис. 1, б представлены первые три моды системы резонансных стоячих волн давления в ПК в условиях возникновения ТАН. Характерно, что подсистема «А» способна возбуждать резонансные ТАК посредством двух физических механизмов: а) прямого резонансного возбуждения колебаний в подсистеме «В» за счет энергии, непосредственно подводимой к ней от подсистемы «А»; б) параметрического резонанса, достигаемого в подсистеме «В» за счет периодической модуляции в ней скорости звука в двухфазном парожидкостном столбе как колебательного параметра.

Таким образом, согласно модельному подходу, предложенному в [8, 9], возникновение ТАН в неравновесном двухфазном парожидкостном потоке, движущемся в ПК, определяется условиями возбуждения в этом канале акустических резонансов, которые проявляют себя в виде системы стоячих волн давления, возникающих в определенном диапазоне паросодержаний этого потока. Характерно, что ПК рассматривается только как резонатор типа «узкая труба», в котором и формируется система резонансных стоячих волн. В соответствии с основными физическими закономерностями развития резонансных колебаний частоты волн ТАК в рассматриваемых условиях определяются только геометрической длиной канала и паросодержанием, достигнутым в кипящем потоке. Согласно данным фундаментальных исследований [10, 11], паросодержание в ПК предопределяет соответствующее его величине значение скорости звука c как основного колебательного параметра резонансной парожидкостной системы. Косвенным подтверждением справедливости физической модели [8, 9] может служить и тот факт, что зоны ТАН в ПК, согласно данным работ [2, 7–9], были обнаружены только в области недогретого кипения, т.е. в достаточно узком – резонансном – диапазоне паросодержаний. В этой связи следует, однако, отметить, что теплогидравлические режимы ПК, в которых возможно достижение акустически-резонансных паросодержаний, в настоящее время практически не могут надежно прогнозироваться расчетным путем. Именно по этой причине модельный подход [8, 9] не может быть положен в основу построения расчетной методики определения границ диапазона режимных параметров кипящей системы, которые соответствуют условиям возникновения ТАН.

Применяемая в настоящее время расчетная методика определения областей существования ТАН [5] основана на предположении, что возникновение ТАК в ПК определяется характером термодинамической работы, совершаемой в волнах возмущения восходящего парожидкостного потока при конденсации на теплоотдающей поверхности паровых пузырей. В случае совершения этими пузырями положительной работы в кипящем потоке возможно возникновение автоколебаний давления, т.е. ТАН. При этом знак суммарной работы конденсирующихся паровых пузырей зависит от сочетаний значений режимных параметров процесса теплообмена и геометрии ПК. В основу модели [5] положена неравновесная полидисперсная модель, линеаризация которой, по мнению авторов, позволяет определить диапазоны режимных параметров, а именно: теплового потока q , давления p , массовой скорости ρ_w , входного недогрева $\Delta t_{нед}$ – которые соответствуют областям возникновения ТАН.

Таким образом, представляется возможным констатировать следующее. Во-первых, ТАН в ПК является потенциально опасной теплогидравлической аномалией, возникновение и развитие которой в каналах высокофорсированных теплообменных устройств, включая водоохлаждаемые ядерные реакторы (ЯР), способно инициировать разрушение стенки кипящего канала. Следует особо подчеркнуть тот факт, что это явление может возникнуть при достаточно низких значениях тепловых потоков, когда расчетный запас по располагаемой допустимой мощности ПК относительно возникновения кризиса теплоотдачи (т.е. запас по критическому тепловому потоку — КТП) в процессе эксплуатации теплообменного устройства еще не превышен. Во-вторых, ввиду того, что в центральных каналах активной зоны (АкЗ) реакторов ВВЭР возможно недогретое кипение теплоносителя на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ, высокочастотную ТАН в реакторных каналах следует рассматривать как один из важных физических факторов, непосредственно влияющих на безопасность и ресурсные характеристики ЯР. В-третьих, имеет место серьезный дефицит надежных экспериментальных данных и теоретических разработок относительно условий возникновения и развития ТАК в ПК. При этом фактически отсутствует информация о ряде определяющих структурных характеристик ТАК, в первую очередь, касающаяся динамики изменения спектральных параметров этих колебаний. Неизвестна также и взаимосвязь спектральных параметров ТАК с физическим механизмом разрушения ТВЭЛ в условиях возникновения ТАН.

3. Обсуждение экспериментальных данных

С учетом изложенного, а также конкретизированных выше задач в настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования условий возникновения и развития ТАК в экспериментальном ПК кольцевой геометрии. При этом исследование ТАН в указанном ПК выполнено на основе анализа частотной структуры автоспектральной плотности (АСП) сигналов динамического давления с использованием высокотемпературного акустического сенсора, конструкция которого описана в работе [2]. Указанные исследования выполнены на теплогидравлическом стенде, конструкция которого, а также методика измерений и характеристики разработанных сенсоров описаны в работах [12–14].

Типичными в этом отношении являются представленные ниже эксперименты, которые выполнены на двух экспериментальных ПК с поперечным сечением кольцевой геометрии: ПК № 1 $(20 \times 10) \cdot 10^{-3}$ м с длиной обогрева $l_{ог} = 0,12$ м; ПК № 2 $(14 \times 10) \cdot 10^{-3}$ м с $l_{ог} = 0,60$ м. Каждый из указанных ПК образован

наружной необогреваемой цилиндрической трубой и коаксиально расположенным в ней тепловым имитатором ТВЭЛ — трубой из нержавеющей стали 1X18H10T с толщиной стенки 0,5 мм. В экспериментах были исследованы диапазоны низких ($p = 0,098 \dots 0,98$ МПа; $\rho w = 500 \dots 5000$ кг/(м²·с), $\Delta t_{нед} = 0 \dots 100$ К) и высоких ($p = 0,98 \dots 9,8$ МПа; $\rho w = 500 \dots 2500$ кг/(м²·с), $\Delta t_{нед} = 0 \dots 100$ К) параметров потока. В описываемых экспериментах приемная поверхность пьезоэлектрического диагностического сенсора размещалась в наружной цилиндрической трубе с обеспечением ее непосредственного контакта с теплоносителем. В процессе экспериментов, проводившихся в условиях $(p, \rho w, \Delta t_{нед}) = \text{const}$ и $q = \text{var}$, осуществлялась синхронная регистрация следующих теплофизических параметров: температуры обогреваемой стенки ($t_{ст}$) теплового имитатора ТВЭЛ в его выходном кризисном сечении; АСП пульсаций давления, а также интегральной интенсивности акустического шума $I_{ав}$. Указанные измерения проводились при всех основных теплогидравлических режимах ПК, а именно: в условиях конвективного теплообмена, вскипания теплоносителя, его развитого пузырькового кипения, при возникновении нестабильных паровых пленок и кризисе теплоотдачи.

Результаты синхронной регистрации температуры поверхности имитатора ТВЭЛ $t_{ст}$ и интегральной интенсивности акустического шума $I_{ав}$, как функций $\varphi(q)$ в ПК, которые рассмотрены и проанализированы в работе [2], показали, что теплоотдающую поверхность ТВЭЛ в области развитого пузырькового кипения можно считать акустически отделенной от контура циркуляции границами отражения акустических волн, отделяющими кипящий участок от других элементов контура циркуляции с иными значениями волновых сопротивлений. Как известно, акустические колебания в цилиндрическом канале (трубе) с границами отражения, сформированными на его концах, возможны только при дискретном гармоническом ряде собственных резонансных частот, а именно — $f_n = nc/(2L)$, где $n = 1, 2, 3, \dots$ — порядковый номер гармоники (моды) колебания, а L — длина канала. Указанная физическая взаимосвязь позволяет предположить, что ПК, подобно резонатору типа «узкая труба», выделяет из широкополосного шума развитого пузырькового кипения и резонансно усиливает колебания на собственных частотах этого канала. При этом с ростом паросодержания в ПК, которое имеет место при увеличении плотности теплового потока q , изменяется значение скорости звука c , а, следовательно, изменяются и частоты резонансов. Характерно, что при достижении области высоких паросодержаний, как об этом свидетельствуют данные [11, 14], значения возможных резонансных частот колебаний выходят за границы частотной

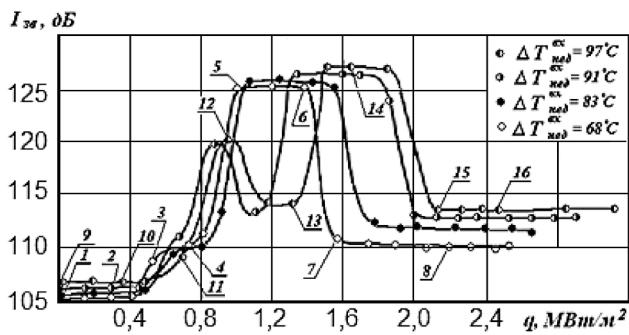


Рис. 2. Результаты экспериментов по исследованию влияния изменения входного недогрева $\Delta t_{нед}$ на локализацию областей ТАН в ПК № 1 по данным работы [6].
Режимные параметры: $p = 0,392$ МПа; $\rho w = 1000$ кг/(м²·с)

полосы спектра шума кипения, который является суперпозицией импульсов давления от растущих и деградирующих в условиях недогретого кипения паровых пузырей. В этих условиях акустические резонансы парожидкостного объема в ПК становятся невозможными и ТАК в канале не возникают. Таким образом, конкретные условия резонанса в определенном диапазоне паросодержаний потока определяют сочетанием режимных параметров $p, \rho w, \Delta t_{нед}$.

В обоснование вышеизложенной резонансной модели возникновения ТАК на рис. 2 [6] представлены типичные результаты исследования влияния недогрева теплоносителя на локализацию областей ТАН в ПК №1, которые проявляют себя в виде зон резонансного возрастания I_{30} . При этом экспериментальным точкам с номерами на этом рисунке соответствуют синхронно зарегистрированные одноименные АСП, которые представлены далее на рис. 3 [6].

Как следует из представленных данных, во всех экспериментах, в которых было обнаружено существование полигармонических ТАК, снижение $\Delta t_{нед}$ смещало область ТАН в зону более низких значений тепловых потоков. Очевидно, что указанная взаимосвязь объясняется следующим образом: рост температуры теплоносителя в ПК приводит к увеличению паросодержания и, соответственно, к росту сжимаемости двухфазного потока. В этих условиях за счет изменения скорости звука необходимые для параметрического усиления ТАК значения паросодержания достигаются при все меньших значениях тепловых потоков.

Анализ представленных на рис. 2 и 3 экспериментальных данных свидетельствует о том, что АСП в области существования ТАН имеют подоб-

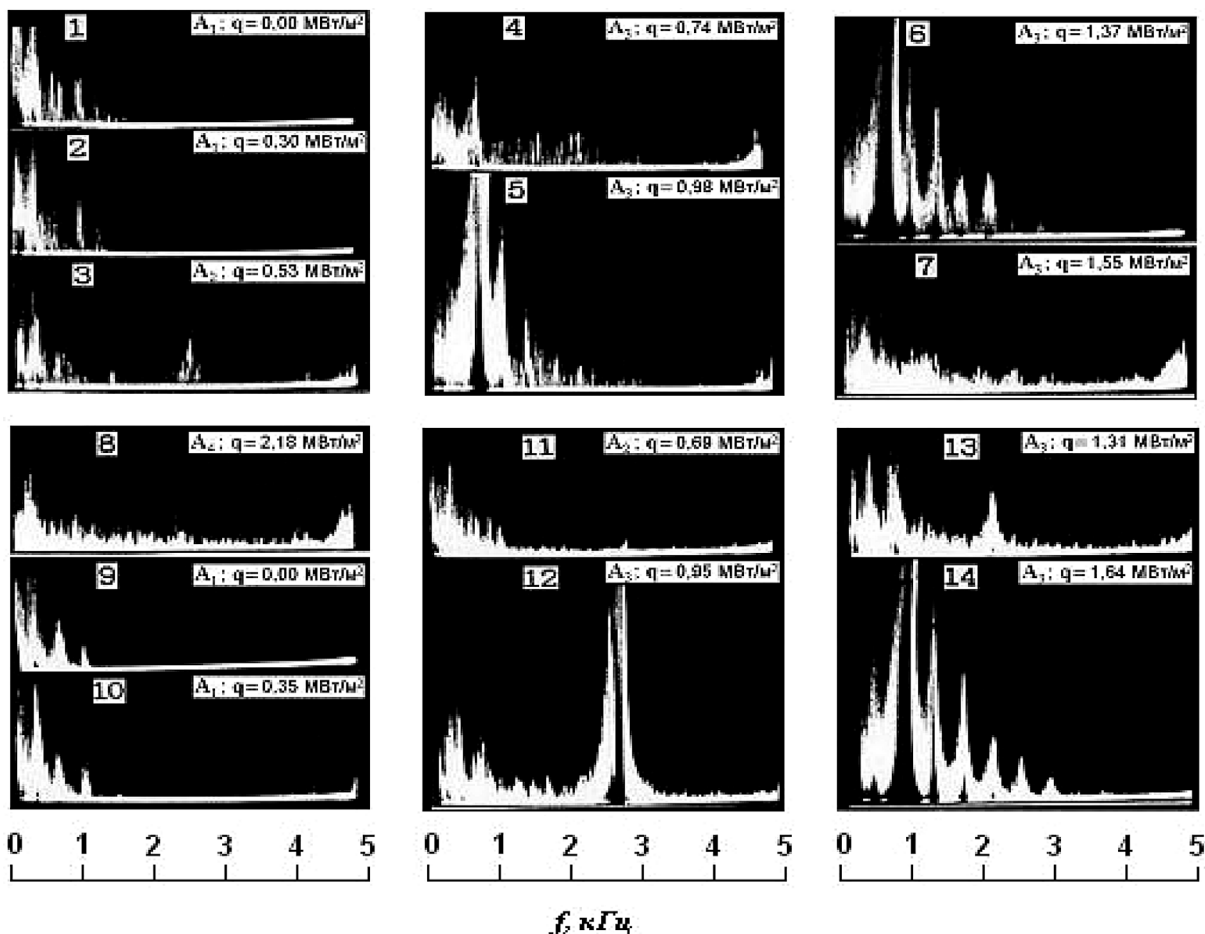


Рис. 3. Влияние недогрева теплоносителя на частотную структуру АСП акустического шума в ПК по данным работы [6]

ную частотную структуру, в которой преобладает первая гармоническая составляющая на частоте $f_1 = 500$ Гц и дискретный ряд последующих гармоник $f_2 = 1000$ Гц, $f_3 = 1500$ Гц и $f_4 = 2000$ Гц.

Показательно, что спектральные составляющие со случайной шумовой структурой в этих АСП в режиме ТАН подавляются, что свидетельствует об управляющем воздействии сформированного в ПК резонансного колебания на процесс пузырькового кипения в пристеночном слое теплоотдающей поверхности имитатора ТВЭЛ. На рис. 4 по данным работы [6] представлены характерные осциллограммы и соответствующие им АСП акустического шума в ПК в режимах ТАН. Показательно, что первая из осциллограмм (на рис. 4, а) соответствует области прямого возбуждения ТАК в виде стоячей волны, когда парожидкостный объем в кипящем канале выделяет и резонансно усиливает колебания на его собственной частоте. Вторая осциллограмма (рис. 4, б) соответствует области параметрического усиления возникшей стоячей волны на более низких частотах, что связано с ростом пародержания и понижением скорости звука в пузырьковой структуре потока.

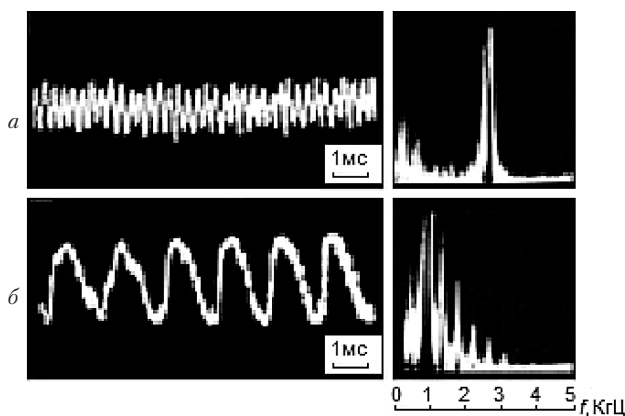


Рис. 4. Осциллограммы ТАК в режимах:
 а – прямого возбуждения ТАК, $q = 0,91$ МВт/м²;
 б – параметрического усиления ТАК, $q = 1,76$ МВт/м². Режимные параметры: $p = 0,392$ МПа; $\rho w = 1000$ кг/(м²·с); $\Delta t_{нед} = 97$ °С

Таким образом, с учетом модельного подхода [8, 9], а также наших данных, подтверждающих эту резонансную модель возникновения ТАК, целесообразно конкретизировать физический механизм разрушения кипящей поверхности в режиме пузырькового кипения в условиях резонансного усиления ТАК. В этой связи представляется физически обоснованной следующая модель динамики пристенного слоя кипящей поверхности. В пучностях стоячей волны повышение давления способно приводить к снижению КТП [1] или же полному подавлению процесса кипения. В каждом из этих случаев имеет место снижение интенсивности теплоотдачи в области локальных максимумов давления на теплоотдающей

поверхности. При этом возникновение указанных максимумов давления динамически воздействует на пузырьковую структуру двухфазного пристенного слоя с частотой, которая соответствует первым, наиболее интенсивным, гармоническим составляющим спектральной структуры ТАК. Следствием указанного воздействия является снижение интенсивности теплоотдачи, которое сопровождается ростом температуры поверхности кипения, который имеет место именно в области существования максимума давления стоячей волны. Указанный динамический процесс сопровождается интенсивным термоциклированием теплоотдающей поверхности с частотой ТАК. Развитие в этих условиях многоциклового термической усталости поверхности кипения инициирует локальное дискретное механическое разрушение обогреваемой стенки, очаги которого возникают с шагом, равным длине стоячей волны в ПК.

На рис. 5 по данным работы [6] представлены фотографии теплоотдающих поверхностей ПК, разрушенных в процессе экспериментов в результате наступления режимов ТАК, а также соответствующие АСП, зарегистрированные при разрушении стенок кипящих каналов.

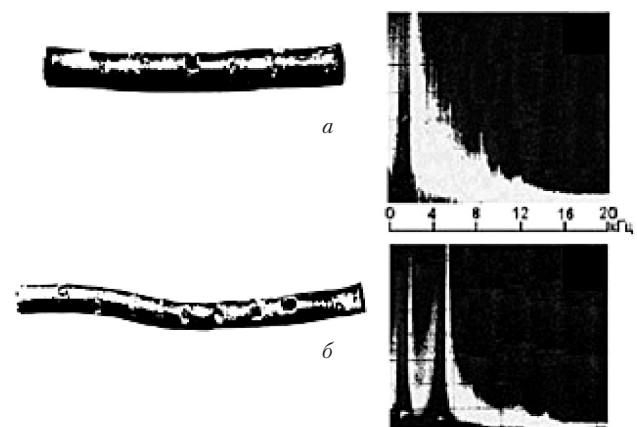


Рис. 5. Характер разрушения имитаторов ТВЭЛ в режимах ТАК и соответствующие частотные структуры АСП:
 а – ПК № 1; б – ПК № 2

Ниже представлены режимные условия описанных экспериментов, которые сопровождались разрушением теплоотдающей поверхности экспериментальных каналов на рис. 5: а) – ПК № 1, параметры $p = 0,294$ МПа; $\Delta t_{нед} = 40$ К; $\rho w = 2000$ кг/м²·с; $q = 1,7$ МВт/м², $q/q_{кр} = 0,33$; $c = 54,86$ м/с; длина волны ТАК на обогреваемой поверхности $\lambda = 0,034$ м; расчетное значение частоты этой волны: $f = c/\lambda = 1613$ Гц; б) – ПК № 2, параметры $p = 6,86$ МПа; $\Delta t_{нед} = 84$ К; $\rho w = 1000$ кг/м²·с; $q = 1,4$ МВт/м², $q/q_{кр} = 0,42$; $c = 213,36$ м/с; длины волн ТАК на обогреваемой поверхности $\lambda_1 = 0,20$ м, $\lambda_2 = 0,04$ м; расчетные значения частот этих волн: $f_1 = c/\lambda_1 = 1066$ Гц, $f_2 = c/\lambda_2 = 5330$ Гц; $f_2/f_1 = 5$.

Как следует из рис. 5, при кипении теплоносителя в кольцевом зазоре каждому из представленных случаев разрушения внутренней обогреваемой трубы ПК соответствует расстояние между областями термического пережога тепловых имитаторов ТВЭЛ, равное приведенной выше расчетной длине волны давления в режиме ТАК, что полностью коррелируется с изложенной выше резонансной моделью ТАН. В этой связи следует отметить, что при наступлении кризиса теплоотдачи, не связанного с возникновением ТАН, разрушение поверхности теплоотдачи обычно имеет исключительно единичный, локальный характер.

Справедливость вышеизложенной резонансной модели ТАН может быть дополнительно подтверждена представленными на рис. 6 по данным работы [2] фотографиями множественного дискретно-волнового характера разрушений поверхности кипения, которые наблюдались при стендовых экспериментах не с кольцевыми, а с цилиндрическими ПК, причем также при значениях теплового потока, существенно меньших, чем расчетные значения КТП.

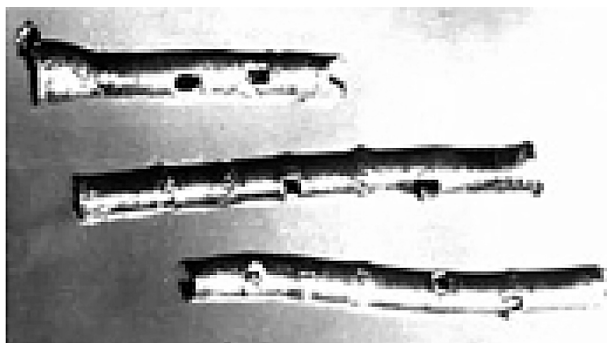


Рис. 6. Дискретно-волновой характер разрушения поверхности кипения цилиндрического ПК в докризисной области при возникновении ТАК

Актуальность вышерассмотренной проблематики специфического разрушения теплоотдающей поверхности ПК, обусловленного возникновением ТАН в режиме недогретого кипения применительно к условиям эксплуатации РУ с водой под давлением подтверждается установленным рядом исследователей (эти данные проанализированы в работе [14]) фактом существования процесса генерации паровой фазы (т.н. подкипания) в центральных ТВС реакторов ВВЭР-1000 в режиме их эксплуатации на номинальной мощности.

Переходя от рассмотрения резонансных колебательных процессов в кипящих каналах к общеконтурной неустойчивости теплоносителя, необходимо отметить следующее. Как известно [1, 3, 14], потоки теплоносителя в первом контуре ЯЭУ способны вызывать аномальные механические колебания оборудования РУ и ее элементов. При этом колебательные процессы относятся к числу главных факторов,

определяющих динамические нагрузки на оборудование, его срок службы и надежность. Наиболее опасным является взаимодействие структурных компонентов первого контура ЯР с потоком теплоносителя в резонансной области колебаний механических элементов контура циркуляции. В этой связи актуальной задачей следует считать оперативный мониторинг виброакустических характеристик главного циркуляционного контура (ГЦК) в различных эксплуатационных режимах при появлении аномалий и в нештатных ситуациях контролировать спектральные характеристики колебаний оборудования, его элементов, а также частоты собственных колебаний теплоносителя. Следует подчеркнуть, что наличие этих данных создает необходимые предпосылки для реализации эффективной оперативной диагностики оборудования РУ в штатных и аварийных режимах эксплуатации. Конечной целью такой диагностики колебательных процессов в оборудовании ЯЭУ является контроль характера спектральных параметров колебательных процессов в первом контуре РУ и распознавание гармонических спектральных характеристик сигналов от датчиков пульсаций давления рабочей среды, а также виброакселерометров с использованием перспективных нейросетевых моделей, основные подходы к реализации которых изложены в работе [15].

Актуальность подобных разработок подтверждается данными работ [16, 17], в которых уделено значительное внимание развитию вышеизложенного резонансного подхода к физической природе колебательной неустойчивости ГЦК. Показательно, что в указанных работах также рассмотрены колебательные процессы, возникающие в заполняющем ГЦК теплоносителя. При этом первый контур реактора ВВЭР рассматривается как гидромеханическая система, основными источниками колебаний в которой являются следующие нестационарные теплогидравлические процессы в теплоносителе: а) кипение и генерируемые в процессе фазового перехода акустические волны, б) турбулентность, в) гидродинамические вихри, г) кавитация, д) несбалансированность циркуляционных насосов и др. Однако в этом случае колебательные свойства гидромеханической системы уже не могут рассматриваться как результат суперпозиции соответствующих параметров колебаний составляющих ее частей. Эта характерная особенность, по мнению авторов работ [16, 17], проявляется в виде специфической трансформации частот, с которыми внешние гидродинамические возмущения воздействуют на ГЦК и его отдельные элементы, а именно: ЯР, парогенератор, трубопроводы. В результате такие преобразования частот вышеуказанных гидродинамических возмущений способны инициировать возникновение в контуре циркуляции теплоносителя колебания с инфранизкими и звуковыми частотами.

Так, например, эксперименты, выполненные в работе [16], показали, что критическое для возникновения колебательной неустойчивости сочетание параметров отмечалось в условиях экспериментального стенда при определенных значениях массового паросодержания x в рабочем участке, в котором двухфазная среда с необходимым соотношением легкой и тяжелой фаз создавалась путем впрыска насыщенного пара. При некотором значении массового паросодержания в этих условиях значение пика сигнала от датчика пульсаций давления в АСП мощности достигало максимального значения. Авторами было установлено, что при некоторых сочетаниях режимных параметров, которые создавались в экспериментах, достигалось состояние параметрического резонанса. В условиях эксперимента этот вид резонанса наблюдался только при двух значениях паросодержания потока: $x = 0,075$ и $x = 0,65$.

На рис. 7, а по данным работ [13, 16] представлены типичные реализации АСП сигналов виброускорений, измеренных на крышке ЯР ВВЭР-1000 в режиме нулевой мощности энергоблока. Отличительной особенностью этих АСП является наличие доминирующего максимума на частоте 49,8 Гц, которая входит в гармонический ряд оборотной частоты ГЦН-195М, составляющей 16,6 Гц. Показательно, что указанный спектральный максимум существенно превышает другие компоненты спектра вибраций, в том числе и связанные с этой оборотной частотой. Характерно, что эта особенность спектра вибраций проявляется только в указанном режиме, т. е. при отсутствии энерговыделения в АкЗ. При увеличении мощности ЯР значение пика на частоте 49,8 Гц существенно уменьшается (см. рис. 7, б).

Эти данные позволяют установить причину увеличения уровня вибраций крышки реактора в условиях отсутствия тепловыделения. Кроме того, они свидетельствуют, что резонансная частота колебаний давления теплоносителя в ГЦК составляет 49,3 Гц и резонансно усиливает колебания, генерируемые ГЦН. В то же время на номинальной мощности ЯР резонансная частота в АкЗ составляет 41,5 Гц, т.е. находится вне области гармонического ряда частот ГЦН.

Наглядной иллюстрацией вышеуказанных процессов могут служить впервые обнаруженные в ходе известных ядерных инцидентов [18, 19] опасные динамические напряжения и трещины в крышках корпусных реакторов PWR. Следует отметить,

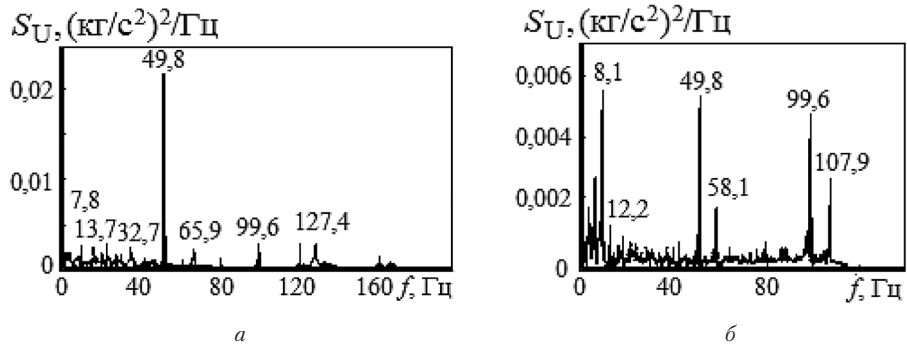


Рис. 7. АСП виброускорений $S_U(f)$ (крышка ЯР):
 а – $p = 15,9$ МПа; $T = 270$ °С; б – $p = 16$ МПа, $T_{гор} = 281$ °С; $T_{хол} = 278$ °С

что за 20 лет до вышеуказанных аварий подобные эффекты проявились в ходе близкой по своему физическому характеру и проявлению максимальной проектной аварии, которая имела место в украинской атомной энергетике и была инициирована срывом крышек горячих коллекторов в трех парогенераторов типа ПГВ-213 ядерного энергоблока № 1 РАЭС в 1982 г. Серьезным радиоэкологическим последствием указанной МПА стал, в частности, выход высокоактивного теплоносителя из первого контура во второй. Следует отметить, однако, что информация об этой серьезной аварии по известным причинам была недоступной зарубежным специалистам, через два десятилетия столкнувшимся с аналогичными физическими проявлениями аномальной колебательной динамики первого контура, которые, как оказалось, способны инициировать повреждения крышки ЯР.

Представленная на рис. 8 по данным работ [2, 12] фотография разрушенного узла крепления крышки горячего коллектора парогенератора ядерного энергоблока с реактором ВВЭР-440 (Ровенская АЭС, энергоблок № 1, авария 22 января 1982 г.) иллюстрирует катастрофический характер разрушений ответственного элемента первого контура РУ вследствие возможного возникновения и даль-

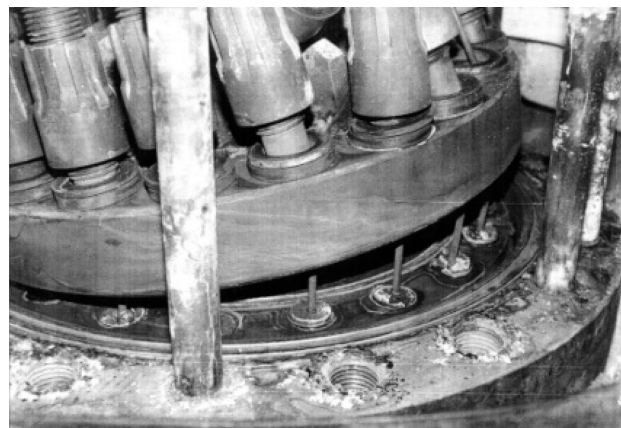


Рис. 8. Характер разрушения шпилек крышки горячего коллектора парогенератора ПГВ-213 на Ровенской АЭС

нейшего неконтролируемого развития аномальной колебательной динамики первого контура.

4. Выводы

Представленные выше материалы позволяют заключить следующее.

1. В ТВС реакторов ВВЭР-1000 в режиме недогретого кипения теплоносителя на номинальной мощности РУ возможно возникновение потенциально опасного и недостаточно изученного вида колебательной неустойчивости, а именно — высокочастотных термоакустических колебаний.

2. Режимы ТАК в ПК способны приводить к разрушению стенок каналов при тепловых нагрузках теплоотдающей поверхности, существенно более низких (в 2–3 раза), чем КТП в отсутствие ТАН двухфазного парожидкостного потока. Разрушение тепловых имитаторов ТВЭЛ в проведенных авторами экспериментах зарегистрировано при тепловых потоках, которые существенно меньше расчетных значений КТП, определяемых известными версиями теплогидравлических кодов.

3. ТАН двухфазного парожидкостного потока проявляет себя как области полигармонических колебаний давления в режиме развитого пузырькового кипения, которые локализованы в резонансном диапазоне паросодержаний потока и обусловлены возбуждением собственных колебаний парожидкостного объема в ПК.

4. Наряду с локализацией зоны возможного возникновения ТАН теплоносителя в ПК, которая ограничена зонами отражения стоячих волн теплоотдающей поверхности АкЗ ЯР, возможно также возникновение нежелательных резонансных эффектов на всей длине петли ГЦК.

5. Возникновение резонансных эффектов на всей длине ГЦК способно инициировать режим интенсивных многоцикловых нагружений крышек корпуса ЯР и горячего коллектора парогенератора, что может привести к накоплению усталостных напряжений, образованию трещин и разрушению этих конструктивных элементов. Имевшие место аварии на отечественных и зарубежных АЭС подтверждают это заключение.

6. Недостаточная обоснованность физических допущений, используемых в рассмотренной «энергетической» модели [5, 20, 21] затрудняет определение границ областей существования ТАН, в связи с чем надежное прогнозирование этого явления на ее основе оказывается неэффективным.

7. Существование характерной гармонической структуры АСП сигналов динамического давления в режимах ТАН в контуре циркуляции теплоносителя реакторов ВВЭР может быть использовано для раннего автоматического распознавания начальных фаз этого опасного эксплуатационного

состояния с помощью перспективных диагностических средств.

8. Надежная идентификация областей существования ТАН может быть обеспечена на основе разработки перспективных подходов, предполагающих симбиоз «резонансной» и «энергетической» моделей. В то же время, следует особо отметить, что реализация оперативного диагностического контроля областей возникновения ТАН в ЯЭУ возможна исключительно на основе применения перспективных средств автоматической диагностики колебательной динамики критических элементов и систем первого контура [15]. В этом смысле подходы к автоматическому распознаванию колебательных аномалий в ЯЭУ на основе моделей искусственного интеллекта (эти подходы предложены в работах [1–3, 15]), альтернативы не имеют.

Авторы выражают искреннюю благодарность коллеге и активному участнику данного цикла исследований Е. И. Шараевской за предоставленные упорядоченные массивы экспериментальных данных и ценные советы при написании статьи.

Литература

- [1] Теплофизика безопасности атомных электростанций / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский / Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. — 484 с.
- [2] Теплофизика повреждений реакторных установок / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский / Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2013. — 528 с.
- [3] Теплофизика надежности активных зон / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский / Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2015. — 772 с.
- [4] Леонтьев А.И., Федоров В.А., Мильман О.О. Новые направления исследований теплообмена при создании современных энергетических установок // Тр. 2-й Российской нац. конф. по теплообмену. — Т. 1. — М.: Изд-во МЭИ, 1998. — С. 59–63.
- [5] Герлига В.А., Скалозубов В.И. Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 432 с.
- [6] Шараевский И.Г. Новый метод распознавания высокочастотной колебательной неустойчивости теплоносителя в каналах ядерных реакторов / Проблемы безопасности АЭС в Чернобыле. — Вып. 10, 2008, С. 60–69.
- [7] Кафенгауз Н.Л., Федоров М.И. Возникновение высокочастотных колебаний давления при теплообмене с диизопропилциклогексаном // ИФЖ. — 1966. — Т.11, №1. — С. 99–104.
- [8] Несис Е.И., Несис О.Е. Резонансные колебания давления при кипении // ИФЖ. — 1988. — Т. 55, № 4. — С. 673–690.

- [9] Дорофеев Б.М. Звуковые явления при кипении. — Изд-во Ростовского университета. — 1985. — 88 с.
- [10] Семенов Н.И., Костерин С.И. Результаты исследования скорости звука в движущихся газожидкостных смесях // Теплоэнергетика. — 1964. — № 6. — С. 46–51.
- [11] Муди Ф.Дж. Модель критического режима течения двухфазной смеси и скорости звука основанная на механизме распространения импульса давления // Теплопередача (Trans. ASME): Сер.С. — 1969. — Т.91, № 3. — С. 84–101.
- [12] Шараевская Е. И. Актуальные задачи виброакустической диагностики первого контура реактора ВВЭР / Проблемы безпеки АЕС і Чорнобиля. — Вип. 25, 2015, С. 25–29.
- [13] Шараевская Е. И. Спектральные характеристики виброакустических колебаний в первом контуре реактора ВВЭР-1000 / Проблемы безпеки АЕС і Чорнобиля. — Вип. 26, 2016, С. 52–57.
- [14] Теплофизика ресурса ядерных энергоустановок / А.В. Носовский, И.Г. Шараевский, Н.М. Фиалко, Л.Б. Зимин, Г.И. Шараевский. — Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины — 2017. — 624 с.
- [15] Шараевський Г.І. Нейрокомп'ютерна діагностична система для раннього виявлення прихованих експлуатаційних аномалій в технологічному обладнанні атомних станцій // Технологічні системи, 2015. — № 4 (73). — С. 95–100.
- [16] Proskouriakov K. N., Moukhine V. S., Sabouni K. Experiment Investigation of System Parameters, Structure Influence on Steam-winter Flow Regime, Pressure Oscillation // Proceedings of the 10th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulic (NURETH-10). — Seoul, Korea. — October 5–9, 2003.
- [17] Проскураков К. Н. Виброакустическая паспортизация АЭС — средство повышения их надежности и безопасности // Теплоэнергетика. — 2005. — № 12. — С. 30–34.
- [18] Millimeters From Disaster // WISE/NIRS Nuclear Monitor. — March 22. 2002.
- [19] Alarm Over Faulty Design in European PWRs // WISE News Communiqui 385. 3770, 2002.
- [20] Хабенский В. В., Герлига В. А. Нестабильность потока теплоносителя в элементах энергооборудования. — СПб: Наука, 1994.
- [21] Скалозубов В. И., Ключников А. А., Комарова Ю. А., Шавлаков А. В. Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР. — Чернобыль, Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010.

Sharaevsky G. I., Fialko N. M., Sharaevsky I. G., Zimin L. B.

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine. Ukraine, Kyiv

EMERGENCY VIBRATION DYNAMICS OF THE FIRST CONTOUR HEATER IN THE VVER REACTORS

An analysis of the features of resonant vibratory processes in the primary circuit of VVER-1000. We consider the acoustic design scheme for determining vibration frequencies of pressure two-phase flow. Shows typical spectra of pressure fluctuations, as well as data on the mode of the destruction of the first circuit elements. For examples of different contingencies reliable vibration of the water-water energetic reactors. It is shown that the lack of deterministic approaches effectiveness to the diagnosis of the current technical condition of VVER reactors elements and systems. The principles of and prospects for the creation of automatic computer diagnosis on the basis of the analysis of the spectral characteristics of the signals of standart parameters of vibration and heat-hydraulic processes sensors for early detection of potentially dangerous conditions. [dx.doi.org/10.29010/086.5]

Keywords: reactor VVER-1000; the first circuit; two-phase flow; pressure pulsations; the natural frequency; design elements; vibration condition.

References

- [1] Thermalphysic of NPP safety / A. A. Kliuchnikov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin, G. I. Sharaevsky / In-t problem bezopasnosti AES NAN Ukrainy, 2010. — 484 p. (Rus)
- [2] Thermalphysic of nuclear reactors damages / A. A. Kliuchnikov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin, N.I. Sharaevskaja / In-t problem bezopasnosti AES NAN Ukrainy, 2013. — 528 p. (Rus)

- [3] Thermalphasic of active zones reliability / A. A. Kliuchnikov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin, G.I. Sharaevsky / In-t problem bezopasnosti AES NAN Ukrainy, 2015. — 772 p. (Rus)
- [4] Leont'ev A.I., Fedorov V.A., Mil'man O.O. New directions of heat transfer research in the development of modern power plants // Proc. 2-th Russian nath. conf. at heat transfer. — V. 1. — Moskwa: Izd-vo MEI, 1998. — P. 59–63. (Rus)
- [5] Gerliga V.A., Skalozubov V.I. Bubble boiling streams in nuclear power plant equipment. — Moskwa: Energoatomizdat, 1992. — 432 p. (Rus)
- [6] Sharaevsky I. G. A new method of high-frequency oscillatory coolant instability recognition in the channels of nuclear reactors // Problems of safety of the NPP and Chernobyl. — Vyp. 10, 2008, P. 60–69.
- [7] Kafengauz N.L., Fedorov M.I. The occurrence of high-frequency pressure oscillations during heat exchange with diisopropylcyclohexane // IFJ. — 1966. — V.11, №1. — P. 99–104. (Rus)
- [8] Nesis E.I., Nesis O.E. Resonance pressure fluctuations at boiling point // IFJ. — 1988. — V. 55, №4. — P. 673–690. (Rus)
- [9] Dorofeev B.M. Sound phenomena during boiling. — Izd-vo Rostovskogo universiteta. — 1985. — 88 p. (Rus)
- [10] Semenov N.I., Kosterin S.I. The results of the study of the speed of sound in moving gas-liquid mixtures // Teploenergenika. — 1964. — № 6. — P. 46–51. (Rus)
- [11] Mudi F.J. Model of the critical flow regime of a two-phase mixture and the speed of sound based on the mechanism of propagation of the pressure pulse // Teploperedacha (Trans. ASME): Ser. C. — 1969. — T.91, № 3. — C. 84–101. (Rus)
- [12] Sharaevskaya E. I. Actual tasks of vibroacoustic diagnostics of the VVER reactor primary circuit // Problems of safety of the NPP and Chernobyl. — Vyp. 25, 2015, P. 25–29.
- [13] Sharaevskaya E. I. Spectral characteristics of vibroacoustic oscillations in the primary circuit of a VVER-1000 reactor // Problems of safety of the NPP and Chernobyl. — Vyp. 26, 2016, P. 52–57.
- [14] Thermalphasic of NPP resource / A. V. Nosovsky, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin, G.I. Sharaevsky / In-t problem bezopasnosti AES NAN Ukrainy, 2017. — 624 c. (Rus)
- [15] Sharaevsky G. I. Neurocomputer diagnostic system for early detection of latent exploitation anomalies in technological equipment of nuclear power plants // Technological systems, 2015. — № 4 (73). — P. 95–100.
- [16] Proskouriakov K. N., Moukhine V. S., Sabouni K. Experiment Investigation of System Parameters, Structure Influence on Steam-winter Flow Regime, Pressure Oscillation // Proceedings of the 10th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulic (NURETH-10). — Seoul, Korea. — October 5–9, 2003.
- [17] Proskouriakov K. N. Vibro-acoustic certification of nuclear power plants is a means of increasing their reliability and safety // Teploenergetika. — 2005. — № 12. — P. 30–34. (Rus)
- [18] Millimeters From Disaster // WISE/NIRS Nuclear Monitor. — March 22. 2002.
- [19] Alarm Over Faulty Design in European PWRs // WISE News Communiqui 385. 3770, 2002.
- [20] Khabensky V. V., Gerliga V. A. Instability of the coolant flow in the elements of power equipment. — Sankt-Peterburg: Nauka, 1994.
- [21] Skalozubov V. I., Kliuchnikov A. A., Komarov Yu. A., Shavlakov A. V. Scientific and technical basis for measures to improve the safety of nuclear power plants with WWER. — Chernobyl, Institute of NPP safety problems NAS of Ukraine, 2010.