

НОВЫЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КАНАЛАХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

И. Г. Шараевский

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Рассмотрена задача и предложен метод распознавания высокочастотной колебательной неустойчивости теплоносителя в каналах ядерных реакторов.

За последние три десятилетия в связи с запросами новой техники (атомной, ракетной и др.) был выполнен ряд исследований процесса кипения в парогенерирующих каналах в условиях вынужденного восходящего движения теплоносителя [1 - 3]. Наряду с прочими результатами, эти исследования показали, что процесс генерации паровой фазы на теплоотдающей поверхности при определенных условиях сопровождается интенсивными полигармоническими колебаниями давления P двухфазного парожидкостного потока с частотами, лежащими в звуковом диапазоне. Амплитуды подобных колебаний давления теплоносителя в кипящем канале A_P могут достигать значений, составляющих 50 - 100 % и более от величины статического давления. Зачастую такие колебания являются непосредственной причиной разрушения теплообменных аппаратов. Некоторые интегральные и качественные акустические показатели подобных колебательных процессов (интенсивность и высота тона) были исследованы в работах [3 - 6 и др.]. В последнее время термоакустическая колебательная неустойчивость (ТАН) парогенерирующих каналов рассматривается специалистами в качестве одного из главных факторов, ограничивающих форсирование мощности и создание новых типов теплообменных устройств [7]. Тем не менее ТАН двухфазных потоков остается одним из наименее изученных видов теплогидравлических колебательных процессов в парогенерирующих каналах.

С учетом известных результатов экспериментальных исследований ТАН двухфазных диабатных неравновесных парожидкостных потоков [1 - 7] внешние проявления процесса возникновения и развития термоакустических колебаний (ТАК) кратко могут быть охарактеризованы следующим образом:

в условиях роста тепловой нагрузки теплоотдающей поверхности ТВЭЛ и возникновения в парогенерирующем канале недогретого пузырькового кипения при достижении плотностью теплового потока q некоторого значения $q_{НГ}$ (соответствующего нижней границе ТАН) могут возникать мощные высокочастотные полигармонические колебания давления, амплитуда которых A_P также растет (см. рис.1, а);

в дальнейшем при достижении q некоторого предельного значения амплитуды ТАК внезапно резко уменьшаются. Последующий рост q приводит к полному исчезновению ТАК при значении $q_{ВГ}$, соответствующем, таким образом, верхней границе ТАН.

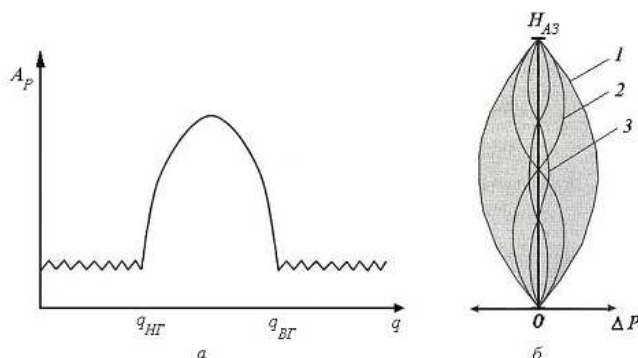


Рис. 1. Физические особенности проявления высокочастотной колебательной неустойчивости парогенерирующего канала [6]: а – качественный характер области локализации ТАН; б – моды стоячих волн в акустически изолированном кипящем канале (1, 2, 3 – номера мод колебательного процесса).

Следует подчеркнуть, что физический механизм возникновения и развития ТАН до настоящего времени изучен недостаточно. Одна из первых попыток объяснения физической природы ТАК [8] связывала их происхождение с ударными волнами, возникающими в условиях деградации паровых пузырей при недогретом кипении теплоносителя на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ. Однако эта гипотеза не дает возможности обоснованно интерпретировать физический механизм усиления этих автоколебаний, а также не может объяснить возникновение ТАК лишь в определенных интервалах паросодержаний пузырьковой структуры двухфазного парожидкостного потока. Иной, более углубленный, физический подход к анализу механизма возникновения ТАН был предложен в работах [9, 10].

Согласно этому модельному подходу, двухфазный парожидкостный поток условно представляется в виде двух колебательных подсистем: подсистемы «А» в виде растущих и деградирующих в двухфазном пристенном слое паровых пузырей, подсистемы «В» в виде объемного резонатора, которым фактически является парожидкостный столб в кипящем канале. При этом колебания подсистемы «В» представляют собой резонансные стоячие волны давления, частоты которых кратны собственной частоте двухфазного парожидкостного столба в кипящем канале.

В качестве примера физического характера таких колебаний давления на рис. 1, б представлены первые три моды системы указанных стоячих волн давления в акустически изолированном парогенерирующем канале в условиях возникновения ТАН [6]. В соответствии с физической моделью [9, 10], подсистема «А» в состоянии возбуждать резонансные ТАК посредством двух физических механизмов:

прямого резонансного возбуждения ТАК в подсистеме «В» за счет энергии, подводимой к ней от подсистемы «А»;

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 [9, 10], возникновение ТАН в неравновесном диабатном двухфазном парожидкостном потоке реально определяется условиями возбуждения в этой кипящей системе ее акустических резонансов. Указанные ТАК в парогенерирующем канале проявляют себя в виде системы стоячих волн давления и формируются в определенном диапазоне паросодержаний термически неравновесного потока. При этом парогенерирующий канал рассматривается только как резонатор типа «узкая труба», в котором (в соответствии с основными физическими закономерностями возникновения резонансных колебаний [11]) и формируется система стоячих волн. С позиций модельного подхода [9, 10] частоты волн ТАК в рассматриваемых условиях определяются только геометрической длиной канала и паросодержанием, достигнутым в кипящем потоке. Как известно [12, 13], именно паросодержание в рассматриваемых условиях обуславливает соответствующее ему значение скорости звука c – основного колебательного параметра системы. Косвенным подтверждением резонансного характера локализации областей ТАН могут служить, например, результаты экспериментов [6], при которых ТАК наблюдались не только в широком диапазоне давлений теплоносителя (воды), но и были обнаружены на стендах с различными теплогидравлическими характеристиками. Обращает на себя внимание также и тот факт, что зоны ТАН, по данным [6], были отмечены только в области недогретого кипения.

Отмечая правомерность и аргументированность предложенного в [9, 10] физического подхода, связывающего возникновение и развитие ТАН в парогенерирующем канале с условиями возникновения акустических резонансов в термически неравновесном диабатном двухфазном парожидкостном потоке, необходимо, тем не менее, указать на следующее. Теплогидравлические режимы парогенерирующего канала, в которых возможно возникновение акустических резонансов парожидкостного столба, в настоящее время не могут быть надежно установлены расчетным путем. В силу этой причины модельный подход [9, 10] не

может обеспечить возможность построения расчетной методики определения границ режимных и геометрических параметров кипящей системы, характеризующих условия возникновения высокочастотной ТАН.

Расчетная методика определения областей существования ТАН впервые была разработана В. А. Герлигой и В. И. Скалозубовым в [2]. Согласно этому подходу, возникновение и развитие ТАК в парогенерирующем канале определяется знаком термодинамической работы, совершаемой в волнах возмущения восходящего парожидкостного потока при конденсации на теплоотдающей поверхности паровых пузырей. При совершении пузырями положительной работы в кипящем потоке возникают самоподдерживающиеся автоколебания давления, которые и проявляют себя в виде ТАК. Знак суммарной работы конденсирующихся пузырей и возникновение области ТАН прямо зависят от конкретных значений режимных параметров процесса теплообмена и геометрических характеристик канала. Теоретическую основу методики [2], получившей развитие в работе [14], составляет неравновесная полидисперсная модель, линеаризация которой позволяет определить диапазоны режимных параметров (q , P , массовой скорости ρw , недогрева $\Delta T_{нед}$), соответствующие области существования ТАН.

Следует отметить аргументированность, физическую обоснованность и несомненную перспективность методик [2, 14]). Однако при этом необходимо учитывать следующие (на первый взгляд, не вполне очевидные) отличия подобных математических моделей определения ТАН от предлагаемой методологии интеллектуальной диагностики теплогидравлических аномалий в активных зонах (АкЗ) ядерных реакторов:

с одной стороны, в основу упомянутых методик положен анализ передаточных функций кипящего канала, рассматриваемого как колебательная система с обратными связями, и предназначены они, главным образом, для предварительной априорной оценки предполагаемых границ возможного возникновения ТАН;

с другой стороны, методы компьютерной оперативной диагностики ТАН, начало разработке которых положено в [15], призваны дополнить расчетные методики и обеспечить надежное обнаружение начальных фаз ТАК непосредственно в АкЗ ядерных реакторов для предотвращения развития ТАН.

Таким образом, с целью выбора эффективных подходов к решению проблемы раннего обнаружения в АкЗ водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов звуковых колебаний высокой интенсивности были проанализированы актуальные вопросы физики высокочастотной колебательной неустойчивости парогенерирующих каналов. Результаты анализа позволяют заключить следующее:

1. Высокочастотная колебательная неустойчивость процесса кипения в парогенерирующих каналах является потенциально опасной теплогидравлической аномалией, возникновение и развитие которой в каналах водоохлаждаемых ядерных реакторов способно инициировать аварийный процесс разрушения оболочки ТВЭЛ и выхода высокорadioактивных газообразных продуктов деления в теплоноситель. Такое явление вполне возможно и при докритических значениях тепловых потоков ($q < q_{кр}$), т.е. в условиях, когда расчетный запас по критическому тепловому потоку (КТП) в процессе эксплуатации тепловыделяющих сборок (ТВС) еще не превышен.

2. Поскольку в ТВС ядерных энергетических установок с реакторами ВВЭР возможно не только кипение теплоносителя на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ, но и возникновение (при определенных условиях) ТАК, высокочастотную колебательную неустойчивость парогенерирующего канала при формировании в нем пузырьковой структуры двухфазного парожидкостного потока следует рассматривать как один из главных факторов, существенно ограничивающих возможность форсирования мощности.

В настоящее время ТАН остается одним из наименее изученных видов колебательной неустойчивости парогенерирующих каналов. При этом:

а) наличие значительный дефицит надежных экспериментальных данных об условиях возникновения и развития ТАК в двухфазных diabatic параожидкостных потоках, а сведения относительно областей локализации ТАН весьма противоречивы;

б) отсутствует информация о ряде определяющих характеристик ТАК, в особенности, об их спектральных параметрах;

в) физический механизм разрушения ТВЭЛ в условиях возникновения в парогенерирующем канале ТАН, а также связь, обуславливающая это разрушение с параметрами ТАК, не установлены;

г) методы оперативного обнаружения и автоматического распознавания ТАК в процессе эксплуатации АКЗ водоохлаждаемых ядерных реакторов не разработаны.

4. В целом необходимо констатировать, что термоакустические процессы при кипении теплоносителя в условиях его вынужденного движения (важной разновидностью которых являются именно ТАК - гармонические колебания давления высокой интенсивности звукового диапазона частот) остаются практически не изученными.

Нами выполнено экспериментальное исследование динамики возникновения и развития ТАК и разработан предлагаемый метод автоматического распознавания областей ТАН. Исследование проведено на основе анализа частотной структуры автоспектральной плотности (АСП) акустического шума в парогенерирующем канале. Исследования проводились на стенде, описанном в более ранних наших публикациях [4, 5], содержащих также методику измерений и характеристики гидрофонов.

Эксперименты выполнены в двух парогенерирующих каналах кольцевой геометрии: первый канал $(20 \cdot 10) \cdot 10^{-3}$ м с длиной обогрева $l_{об} = 0,12$ м (парогенерирующий канал № 1) и второй канал $(14 \cdot 10) \cdot 10^{-3}$ м с $l_{об} = 0,60$ м (парогенерирующий канал № 2). Каждый канал образован наружным цилиндрическим кожухом и коаксиальным тепловым имитатором ТВЭЛ – трубой из нержавеющей стали 1Х18Н10Т с толщиной стенки 0,5 мм. Исследовались диапазоны низких (давление $p = 0,098 \dots 0,98$ МПа; массовые скорости $\rho w = 500 \dots 5000$ кг/м²с, входной недогрев $\Delta t_{нед}^{ex} = 0 \dots 100$ К) и высоких ($p = 0,98 \dots 9,8$ МПа; $\rho w = 500 \dots 2500$ кг/м²с, $\Delta t_{нед}^{ex} = 0 \dots 100$ К) параметров потока. Приемная поверхность высокотемпературных измерительных гидрофонов, установленных в наружном цилиндрическом кожухе каждого из кольцевых каналов, имела непосредственный контакт с теплоносителем. Во всех экспериментах, проводившихся в условиях $(p, \rho w, \Delta t_{нед}^{ex}) = const$ и $q = var$, синхронно осуществлялись измерения температуры стенки (t_{cm}) обогреваемого трубчатого элемента в его выходном кризисном сечении, а также АСП акустического шума и его интегральной интенсивности I_{36} . Подобные измерения проводились при всех подлежащих автоматическому распознаванию классах теплогидравлических режимов парогенерирующего канала: А₁ - конвекции, А₂ - начале кипения, А₃ - развитом пузырьковом, А₄ - нестабильном пленочном кипении, А₅ - кризисе теплоотдачи, а также А₆ - режиме ТАН.

Ранее в наших работах [4, 5] были представлены результаты синхронной регистрации температуры поверхности рабочего элемента $t_{cm} = f(q)$ и $I_{36} = f(q)$ в парогенерирующем канале № 1. Из этих результатов следует, что участок с имитатором ТВЭЛ в режиме развитого пузырькового кипения явно отделяется от остальных участков границами отражения акустических колебаний, имеющими различные значения волновых сопротивлений.

Как известно [11], акустические колебания в трубе с границами отражения на ее концах возможны только при дискретном гармоническом ряде собственных резонансных частот $f_n = nc/(2L)$, где $n=1, 2, 3, \dots$ - порядковый номер гармоники колебания, а L - длина трубы. Данные наших экспериментов подтверждают, что парогенерирующий канал, подобно резонатору типа «узкая труба», выделяет из широкополосного шума развитого пузырькового кипения и резонансно усиливает колебания на собственных частотах. С ростом паросодержания в канале, наблюдающимся при наращивании q , изменяется значение c , а, следовательно, изменяются и резонансы. При достижении высокого паросодержания значения

возможных резонансных колебательных частот выходят за границы частотной полосы спектра шума кипения и акустические резонансы парожидкостного столба становятся невозможными. Конкретные условия резонанса в определенном диапазоне паросодержаний потока определяются сочетанием режимных параметров p , ρw , $\Delta T_{нед}^{ex}$.

В развитие изложенной резонансной модели ТАН на рис. 2 представлено влияние недогрева теплоносителя на локализацию областей ТАН в парогенерирующем канале № 1, проявляющих себя в виде зон резонансного возрастания $I_{зв}$. Экспериментальным точкам с номерами на рис. 2 соответствуют одноименные АСП, представленные далее на рис. 3. Как следует из приведенных данных, во всех экспериментах с существованием полигармонических ТАК снижение $\Delta T_{нед}^{ex}$ перемещает область ТАН в зону меньших тепловых потоков. Отмеченное явление объясняется следующим образом: рост температуры теплоносителя в парогенерирующем канале приводит к увеличению паросодержания и, соответственно, сжимаемости двухфазного потока. При этом за счет изменения скорости звука необходимые для параметрического усиления ТАК значения паросодержания достигаются при меньших тепловых потоках.

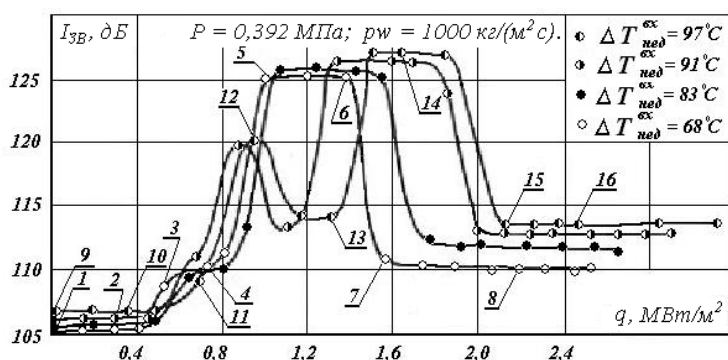


Рис. 2. Влияние $\Delta T_{нед}^{ex}$ на локализацию областей ТАН в парогенерирующем канале № 1.

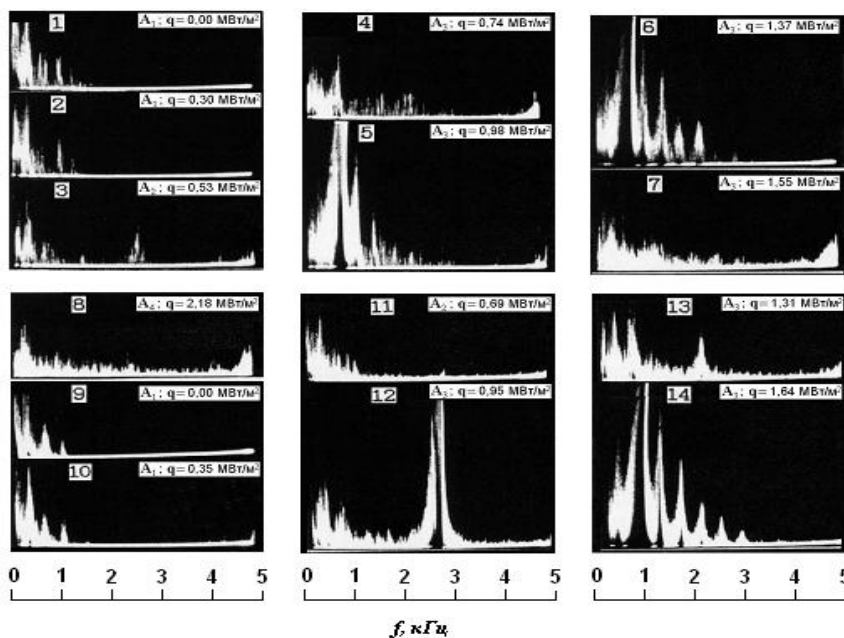


Рис. 3. Влияние недогрева теплоносителя на частотную структуру АСП акустического шума в парогенерирующем канале.

Анализ данных, представленных на рис. 2 и 3, свидетельствует о том, что все АСП в пределах ТАН имеют сходную частотную структуру с преобладанием низкочастотной гармонической составляющей $f_1 = 500$ Гц и дискретным рядом гармоник $f_2 = 1000$ Гц, $f_3 = 1500$ Гц и $f_4 = 2000$ Гц. Спектральные составляющие со случайной шумовой структурой в этих АСП практически подавляются, что свидетельствует об управляющем воздействии этого резо-

нансного колебания на процесс кипения в пристеночном слое теплоотдающей поверхности. На рис. 4 представлены осциллограммы и соответствующие им АСП акустического шума для экспериментальных точек 12 и 14. Первая из осциллограмм соответствует области прямого возбуждения ТАК в виде стоячей волны, когда парожидкостный столб в кипящем канале выделяет и резонансно усиливает колебания с его собственными резонансными частотами. Вторая осциллограмма соответствует параметрическому усилению стоячей волны на более низких частотах в связи с ростом паросодержания потока.

$$P = 0,392 \text{ МПа}; \quad \rho_w = 1000 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{с)}; \quad \Delta T_{\text{нед}}^{\text{БК}} = 97 \text{ }^\circ\text{C}$$

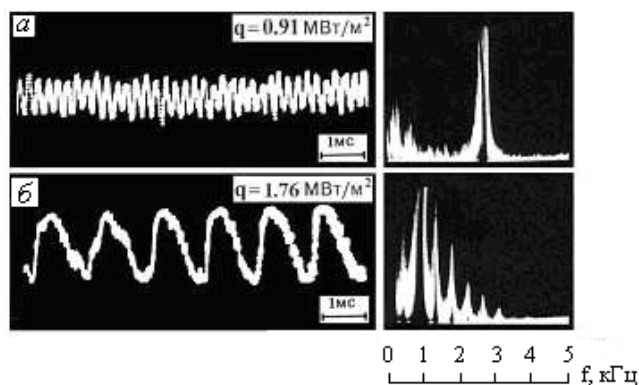


Рис. 4. Осциллограммы ТАК в режимах: а - прямого возбуждения ТАК; б – параметрического усиления ТАК.

Исходя из вышеизложенного, механизм потенциального разрушения кипящей поверхности в режиме пузырькового кипения в условиях описанного резонансного усиления ТАК представляется возможным физически обосновать следующей моделью динамики пристеночного слоя кипящей поверхности. В пучностях стоячей волны повышение давления приводит к снижению величины $q_{кр}$ (особенно в области высоких давлений) или подавлению процесса кипения (рис. 4, б), что в обоих случаях приводит к снижению интенсивности теплоотдачи в области локальных максимумов давления на теплоотдающей поверхности, воздействующих на пузырьковую структуру двухфазного пристенного слоя с частотой первых наиболее интенсивных гармонических составляющих ТАК. Следствием этого является снижение теплоотдачи, сопровождаемое ростом температуры кипящей поверхности в области максимума давления и интенсивным термоциклированием поверхности нагрева с частотой ТАК. Последнее и обуславливает разрушение кипящей поверхности. Обоснованность этой модели разрушения ТВЭЛ подтверждают результаты распознавания с помощью искусственной нейронной сети (ИНС) [16] АСП режима класса A_6 , соответствующего режиму ТАК, в котором были отмечены аномально низкие значения $q_{кр}$.

На рис. 5 представлены фотографии теплоотдающих поверхностей парогенерирующих каналов, разрушенных в процессе экспериментов в результате наступления резонансных ТАК, а также соответствующие АСП, зарегистрированные при разрушении указанных ТВЭЛ.

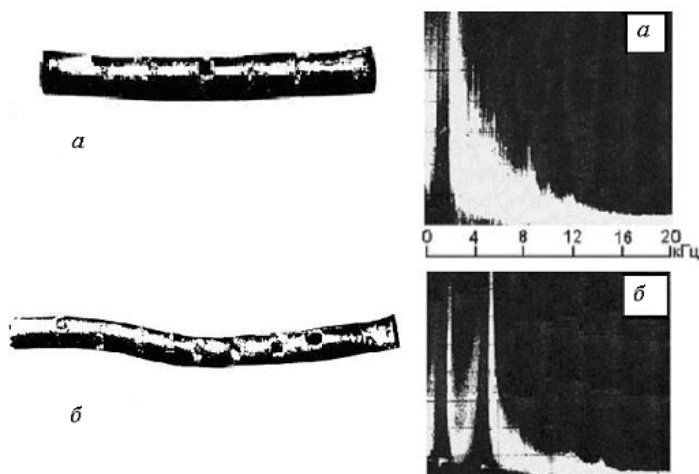


Рис. 5. Характер разрушения имитаторов ТВЭЛ в режимах ТАК и соответствующие частотные структуры АСП: а – парогенерирующий канал № 1, б – парогенерирующий канал № 2.

Условия проведения экспериментов с разрушением теплоотдающих поверхностей, результаты которых представлены на рис. 5: *a* – парогенерирующий канал №1, параметры $p = 0,294$ МПа; $\Delta t_{нед}^{6x} = 40$ К; $\rho_w = 2000$ кг/м³; $q = 1,7$ МВт/м², $q/q_{кр} = 0,33$; $c = 54,86$ м/с; длина волны ТАК на поверхности ТВЭЛ $\lambda = 0,034$ м; расчетное значение частоты этой волны: $f = c / \lambda = 1613$ Гц; *b* – парогенерирующий канал № 2, параметры $p = 6,86$ МПа; $\Delta t_{нед}^{6x} = 84$ К; $\rho_w = 1000$ кг/м³; $q = 1,4$ МВт/м², $q/q_{кр} = 0,42$; $c = 213,36$ м/с; длины волн ТАК на поверхности ТВЭЛ $\lambda_1 = 0,20$ 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; $f_2 / f_1 = 5$.

Из рис. 5 отчетливо видно, что для каждого из этих случаев расстояние между областями пережога ТВЭЛ соответствует расчетной длине волны в экспериментальном канале и коррелируется с изложенной резонансной моделью ТАК.

Наиболее информативными для реализации предлагаемого метода использования анализа технологических шумов реакторных установок (и решения с его помощью комплекса задач автоматического распознавания предаварийных и аномальных теплогидравлических процессов в ТВС энергетических ядерных реакторов) являются спектральные параметры флуктуационных составляющих сигналов ряда имеющихся в составе оборудования диагностических датчиков. В особенности сказанное относится к датчикам динамического давления и пульсаций гидравлического сопротивления парогенерирующего канала, а также флуктуаций нейтронного потока в АкЗ реакторов водо-водяного типа. Как уже указывалось нами в работе [17], методы нейроиформатики на основе ИНС являются эффективным средством распознавания ТАК и могут быть использованы при решении задач раннего обнаружения высокочастотной ТАН в ТВС водоохлаждаемых ядерных реакторов.

Предложенный нами в [18] новый подход к решению задачи раннего автоматического обнаружения ТАК в АкЗ реактора ВВЭР по параметрам нейтронного шума, регистрируемого в ТВС ядерных реакторов, осложнен тем, что подлежащие идентификации режимы ТАК являются случайными объектами. В силу этого для их распознавания могут быть эффективно использованы некоторые из топологий ИНС, в частности нейронная сеть Хэмминга [19].

Практическая реализация методологии ИНС применительно к задаче распознавания ТАК требует предварительной разработки ряда вычислительных процедур предобработки диагностического сигнала, призванных обеспечить не только оптимизацию собственно процедуры распознавания информационно значимых спектральных компонент диагностируемого сигнала, но и возможность его эффективного выделения на фоне случайных помех.

Стратегия разработки и практической реализации предлагаемого метода в первую очередь предполагает использование оптимизационного подхода к уменьшению размерности входного многомерного вектора диагностического сигнала, подлежащего распознаванию (в данном случае этим вектором является АСП нейтронного шума). Результатом указанной процедуры является определение минимального количества нейронов входного слоя ИНС, способного обеспечить высокую надежность правильной идентификации входного вектора неизвестной принадлежности.

Далее подлежат разработке процедуры предобработки диагностического нейтронного сигнала технологических шумов АкЗ ядерных реакторов, обеспечивающие его фильтрацию (возможность уменьшения шумов, не связанных с процессом генерации паровой фазы и, следовательно, не являющихся информационно значимыми при распознавании режима возникновения ТАК в ТВС). В результате этого повысится надежность правильной идентификации АСП нейтронного шума, характеризующего, наряду с процессами фазового перехода при кипении на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ, также и условия возникновения ТАК.

Сущность оптимизационного подхода к задаче распознавания случайного диагностического вектора состоит в следующем (постановка задачи распознавания режимов течения и ее формализация для нейронной сети выполнены ранее и приведены в [17]).

На вход нейронной сети подается вектор из 242 значений, представляющий сглаженный диагностический сигнал. В поставленной задаче диагностируемый сигнал - это нормированный амплитудно-частотный спектр нейтронного шума. Выходом является идентификатор наиболее вероятного теплогидравлического режима ТВС. При этом множество распознаваемых классов составляют следующие режимы теплообмена на поверхности ТВЭЛ: конвективный, начала кипения, пузырьковой структуры потока и, наконец, режим возникновения ТАК ($A_1...A_6$).

Сокращение размерности входного вектора нейронной сети заключается в уменьшении количества определяющих входной сигнал дискретных значений. Следствием этого является уменьшение количества вычислительных операций, необходимых для распознавания, и времени реализации задачи. Таким образом, необходимо определить минимальное количество разбиений сглаженного сигнала, которое позволяет корректно определить режим теплообмена на поверхности ТВЭЛ.

Стандартная предобработка сигнала фактически представляет собой реализацию цифрового фильтра низких частот. Этапы предобработки сигнала приведены на рис. 6. Прямое преобразование Фурье позволяет получить частотный спектр исходного сигнала. Далее его малоинформативные высокочастотные спектральные составляющие обнуляются. В результате обратного преобразования Фурье получаем сглаженный сигнал - без высокочастотной составляющей. Исходный и сглаженный сигналы имеют одну и ту же размерность.

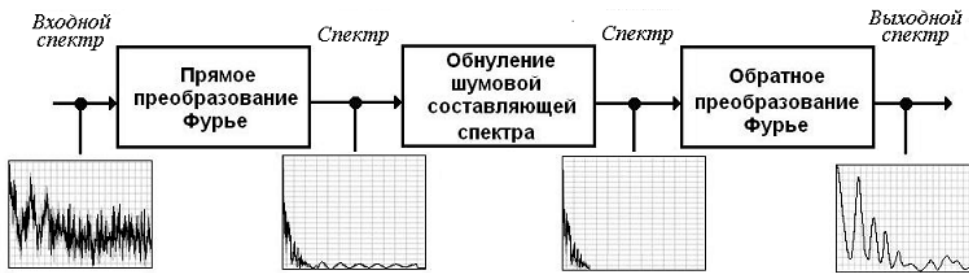


Рис. 6. Схема цифровой предобработки диагностического вектора

Моделирование нейронной сети с целью уменьшения количества ее входов произведено с помощью специально созданной системы моделирования работы нейронной сети, в которой помимо искусственной сети Хэмминга реализованы все этапы полной предобработки сигнала. С этой целью был программно реализован автоматический компьютерный распознаватель на основе ИНС с топологией Хэмминга [19]. Моделирование осуществлено за счет варьирования следующих параметров: уровня шума относительно максимальной амплитуды; порядка значащих гармоник; размерности сокращенного диагностического сигнала.

Минимизация последнего из указанных показателей являлась конечной целью проведенных вычислительных экспериментов, в ходе которых при условии обеспечения стопроцентного распознавания режима теплообмена поочередно изменялись этот и другие параметры. При вычислительных экспериментах преднамеренно вводился завышенный уровень зашумленности (до 40 % от максимальной амплитуды самого сигнала), заведомо превышающий стандартную зашумленность полезного сигнала высокочастотными шумовыми состав

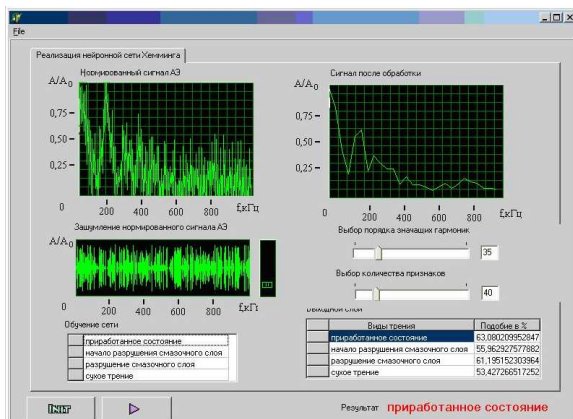


Рис. 7. Интерфейсная форма сети Хэмминга с параметрами объекта диагностики – режима ТАК – в условиях воздействия маскирующих технологических шумов.

ляющими технологических шумов, не связанными с процессом генерации паровой фазы. В качестве иллюстрации этапов предобработки диагностического сигнала нейтронного шума на рис. 7 представлена разработанная интерфейсная форма компьютерного распознавателя.

Для оценивания эффекта от сокращения количества нейронов входного слоя нейронной сети была введена относительная временная характеристика. За единицу принято время распознавания исходного сигнала размерностью $N = 242$. Вычислительные эксперименты показали, что в данной прикладной задаче время надежного распознавания можно сократить примерно в четыре раза, обеспечивая тем самым компьютерную идентификацию неизвестных реализаций нейтронного шума в онлайн-режиме, т.е. в масштабе реального времени.

По результатам выполненных вычислительных экспериментов составлена таблица, данные которой характеризуют условия сохранения 100 % надежности распознавания при различных уровнях зашумленности подлежащего распознаванию диагностируемого вектора и уменьшении мерности пространства используемых при распознавании признаков.

Условия функционирования сети Хэмминга при сохранении 100 %-ной надежности распознавания режима теплообмена

Уровень шума	10	15	20	25	30	35	40
Размерность входного вектора	242	210	178	142	108	74	40
Относительная временная характеристика	1	0,89	0,71	0,59	0,45	0,33	0,25

На рис. 8 в виде интерфейсной формы зависимости нормированного времени формирования диагностических решений от размерности входного диагностического вектора нейтронного шума представлены результаты математического моделирования распознавания ТАК с помощью программно реализованной ИПС с топологией Хэмминга, полученные в ходе вычислительных экспериментов. Представленные данные свидетельствуют о том, что оптимизированный на основе реализованного подхода диагностический сигнал существенно сокращает время распознавания нейронной сетью режимов течения теплоносителя.

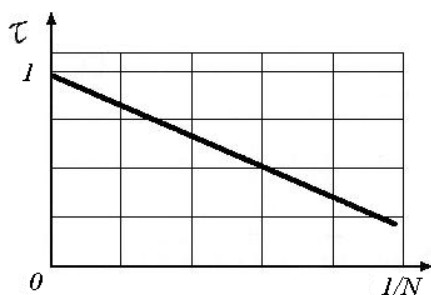


Рис. 8. Зависимость нормированного времени формирования диагностических решений от количества диагностических признаков спектра распознаваемого сигнала.

Таким образом, данный метод может быть успешно использован в структуре перспективной системы внутрореакторного контроля (СВРК), функционирующей в реальном времени.

Выводы

1. Режимы ТАН при возникновении кризиса теплоотдачи в парогенерирующих каналах АкЗ ядерных реакторов приводят к разрушению ТВЭЛ при значениях теплового потока, существенно более низких, чем в отсутствие этого вида колебательной неустойчивости.

2. Программно реализованная в настоящей работе ИНС обеспечила 100 %-ную надежность распознавания потенциально опасного предаварийного режима ТАК в АкЗ водородного ядерного реактора по параметрам информационно значимых реакторных шумов.

3. На основе нейронной сети Хэмминга разработана программная система моделирования минимально достаточного количества дискретизаций отфильтрованного диагностического сигнала для надежного распознавания теплогидравлических режимов в ТВС энергетических водо-водяных ядерных реакторов.

4. Разработанное математическое и программное обеспечение для компьютерного комплекса штатной СВРК реактора ВВЭР может быть эффективно использовано в качестве интеллектуального диагностического модуля с целью автоматического распознавания высокочастотной колебательной неустойчивости ТВС в процессе эксплуатации водо-водяных ядерных реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Делайе Дж., Гуо М., Ритмюллер М.* Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 424 с.
2. *Герлига В.А., Скалозубов В.И.* Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
3. *Несис Е.И., Дорофеев Б.М.* О высокочастотных колебаниях давления в трубе с поверхностно кипящим потоком // ТВТ. – 1976. – Т. 14, № 1. – С. 132 - 138.
4. *Sharaevski I.G.* Acoustic Phenomena Accompanying Boiling of Water in Annuli under Forced Convection // Heat Transfer. Soviet Research. New York, «Scrnta Publishing». – 1977. – Vol. 9, № 3. – P. 47 - 55.
5. *Sharaevski I.G.* Onset and Development of Term acoustic Oscillations in Forsed Convection Boiling of Water.// Heat Transfer. Soviet Research. New York, «Scrnta Publishing». – 1980. – Vol. 12, № 1. – P. 91 - 102.
6. *Коврижкін Ю.Л.* Термоакустична нестійкість теплоносія в активній зоні водо-водяних енергетичних реакторів: Автореф.дис. ... канд. техн. наук. – К.: НТУУ «КПІ», 2001. – 24 с.
7. *Леонтьев А.И., Федоров В.А., Мильман О.О.* Новые направления исследований теплообмена при создании современных энергетических установок // Тр. 2-й Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 1. - М.: Изд-во МЭИ, 1998. – С. 59 - 63.
8. *Кафенгауз Н.Л., Федоров М.И.* Возникновение высокочастотных колебаний давления при теплообмене с диизопропилциклогексаном // ИФЖ. – 1966. - Т. 11, № 1. – С. 99 - 104.
9. *Несис Е.И., Несис О.Е.* Резонансные колебания давления при кипении // Инженерно-физический журнал. – 1988. – Т. 55, № 4. – С. 673 - 690.
10. *Дорофеев Б.М.* Звуковые явления при кипении. – Изд-во Ростов. ун-та. – 1985. – 88 с.
11. *Исакович М.А.* Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 383 с.
12. *Семенов Н.И., Костерин С.И.* Результаты исследования скорости звука в движущихся газожидкостных смесях // Теплоэнергетика. – 1964. - № 6. – С. 46 - 51.
13. *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.
14. *Антонюк Н.И., Герлига В.А.* Расчетная методика определения границ термоакустической устойчивости // Двухфазные потоки в тепловом оборудовании атомных электростанций. – Одесса, 1998. - С. 31 - 32.
15. *Шараевский И.Г., Письменный Е.Н., Домашев Е.Д.* Возможности совершенствования компьютерных систем контроля АЭС на основе методов искусственного интеллекта // Пром. теплотехника. – 2000. – Т. 22. – № 1. С. 70 - 77.
16. *Luger G.* Artificial intelligence. – Addison Wesley, UK. – 2002. – 864 p.
17. *Долинский А.А., Шараевский И.Г., Фиалко Н.М., Басок Б.И.* Методология распознавания и верификации кризисов теплоотдачи в стержневых сборках // Пром. теплотехника. – 2005. – Т. 27. - № 6. – С. 66 - 80.
18. *Sharaevskij I.* A methodology for discerning incipient boiling of the coolant in a water-moderated, water-cooled (pressurized-water) nuclear reactor by means of the bayesian neutron-noise classifier // Proc. 14-th Intern. Conf. on Nuclear Engineering (Icne-14) July 17 - 20, 2006, Miami, Flo, USA, Paper ICONE 14-89630. – 8 p.
19. *Lippman R.* An introduction to computing with neural nets // JEEE ASSP Magazine. – 1987. - № 4. – P. 4 - 22.

Поступила в редакцию 01.09.08

**НОВИЙ МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ КОЛИВАЛЬНОЇ
НЕСТІЙКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ В КАНАЛАХ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ**

І. Г. Шараєвський

Розглянуто проблеми та запропоновано метод розпізнавання високочастотної коливальної нестійкості теплоносія в каналах ядерних реакторів.

**NEW METHOD FOR RECOGNITION OF THE HEAT-CARRIERS HIGH-FREQUENCY
OSCILLATORY INSTABILITY IN CHANNELS OF NUCLEAR REACTORS**

I. G. Sharaevsky

The problems is considered and the method for recognition of high-frequency oscillatory heat-carrier instability in channels of nuclear reactors is offered.

Відомості про автора:

Шараєвський Ігор Георгійович, науковий ступінь – канд. техн. наук, наукові звання – доцент, ст. наук. співр., посада – пров. наук. співр. відділу Надійності теплотехнічного обладнання енергоблоків АЕС Інституту проблем безпеки АЕС НАН України, тел. 525–2472.