

УДК 536.242:532.542

Долинский А.А., Шараевский И.Г., Фиалко Н.М.,
Басок Б.И., Архипов А.П., Колесниченко Ю.М.

Институт технической теплофизики НАН Украины

МЕТОДОЛОГИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ И ВЕРИФИКАЦИИ КРИЗИСОВ ТЕПЛООТДАЧИ В СТЕРЖНЕВЫХ СБОРКАХ

Розроблено ефективні алгоритми розпізнавання (класифікації) випадкових процесів, які після відповідного спектрального перетворення розглядаються як багатомірні випадкові вектори. Подано результати аналізу стану досліджень кризи тепловіддачі в пучках стрижнів при наявності нерівномірності розподілу теплогідрравлічних параметрів.

Разработаны эффективные алгоритмы распознавания (классификации) случайных процессов, которые после соответствующего спектрального преобразования рассматриваются как многомерные случайные векторы. Представлены результаты анализа состояния исследований кризисов теплоотдачи в пучках стержней при наличии неравномерности распределения теплогидравлических параметров.

Efficient algorithms of random process identification (classification) that after respective spectral transformation are considered as multidimensional random vectors were developed. The state of studies in crisis of convective heat transfer in rod bundles has been analyzed with estimation of different approaches to generalization of experimental data.

A – класс образов;
B – распознаваемый объект;
i – энтальпия ячейки;
F – порог функции активации;
f – частота, функция активации;
I – интегральная интенсивность шума;
M – мощность множества классов;
m – число нейронов;
n – число синапсов;
p – давление;
q – плотность теплового потока;
R – мощность множества градаций;
t, T – температура;
w – скорость;
x – расходное массовое паросодержание;
X – вектор-реализация;
 ϵ – весовой коэффициент;
 ρ – плотность.
Индексы верхние:
p – расчет;
э – эксперимент;
яч – ячейка.
Индексы нижние:
s – насыщение;

г – горячий;
гр – граничный;
вх – вход;
кр – критический;
нед – недогрев;
п – пучковой;
ст – стенка;
АкЗ – активная зона;
АСП – автоспектральная плотность;
АЭС – атомная электростанция;
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;
ИИ – искусственный интеллект;
ИНС – искусственная нейронная сеть;
КА – кипящий аппарат;
КТП – критический тепловой поток;
ПГ – парогенерирующий;
СПО – средства поддержки оператора;
ТАК – термоакустические колебания;
ТАН – термоакустическая неустойчивость;
ТВС – тепловыделяющая сборка;
ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;
ЭС – экспертная система;
ЯР – ядерный реактор;
ЯЭУ – ядерная энергоустановка.

Согласно [1, 2], одной из наиболее неотложных проблемных задач безопасности АЭС в на-

стоящее время является локальная верификация базовых корреляций для расчета КТП в ТВС во-

доохлаждаемых ЯР, которые уже реализованы и используются во всех версиях теплогидравлических кодов улучшенной оценки: RELAP-5, TRAC (США), ATHLET (Германия), THYDE (Япония), CATHENA (Канада), CATHARE (Франция), CORSAR (Россия). Согласно данным аналитического обзора [3], во всех указанных программных комплексах, включая наиболее широко используемые их модификации — RELAP, ATHLET, TRAC, — для расчета КТП используются эмпирические соотношения, полученные на основе экспериментов в трубах. Вместе с тем известно [2, 3], что для отечественных ЯЭУ с реакторами ВВЭР этими соотношениями следует пользоваться со значительной осторожностью, т.к. они дают существенно завышенные значения КТП при аварийных пониженных режимных параметрах ЯР, а также весьма неточно описывают экспериментальные данные даже для ТВС с квадратной решеткой, не говоря уже о сборках ТВЭЛ с гексагональной геометрией, характерной для отечественных реакторных установок. С момента появления указанных кодов расчетные соотношения для оценки КТП в реакторных каналах с учетом неравномерности распределения теплогидравлических параметров по сечению ТВС (это неравномерность реально имеет место и принципиально должна учитываться при расчете кризиса теплоотдачи в стержневых сборках) фактически не были верифицированы, начиная с первых модификаций этих программных комплексов, разработанных более 20 лет назад. В контексте проблемы повышения точности оценок КТП при численном анализе аварийной динамики реакторных установок определяющим является следующий факт. Расчеты кризисов теплоотдачи в каналах водоохлаждаемых ЯР во всех версиях наиболее совершенных зарубежных кодов — RELAP, ATHLET, TRAC и другие — до настоящего времени безальтернативно реализуются на основе эмпирических соотношений, полученных в экспериментах только с цилиндрическими каналами. Так, например, версия кода RELAP-5 / MOD 2 для расчета КТП в стержневых сборках использует корреляцию Biasi, полученную в экспериментах с трубами. Согласно оценкам, выполненным [1-3], это обстоятельство предопределяет получение существенно завышенных

расчетных данных по КТП, особенно в диапазоне массовых расходов 1500...3000 кг/м²с. Характерно, что и более поздняя версия этого кода RELAP-5 / MOD 3, несмотря на значительные усовершенствования при расчете КТП в сборках ТВЭЛ предусматривает использование табличных данных по кризису теплоотдачи, полученные в 1986 году Groeneveld в экспериментах только с трубами внутреннего диаметра 0,008 м.

В контексте анализа эффективных подходов к решению задачи безопасности ЯР на основе верификации экспериментальных корреляций для расчета КТП в ТВС водоохлаждаемых ЯР с использованием широкоиспользуемых версий теплогидравлических кодов, в частности, RELAP-5 / MOD 3 важным представляется следующий аспект этой проблемы. Разработка методологии локальной верификации базовых физических моделей и корреляций аварийных теплогидравлических процессов, в первую очередь, кризиса теплоотдачи при кипении тесно взаимосвязана с другой актуальной для практики эксплуатации водоохлаждаемых реакторов проблемой: автоматическим распознаванием кризиса теплоотдачи в парогенерирующих каналах на основе анализа флуктуаций режимных параметров процесса теплообмена. Согласно [4–6], надежная идентификация кризиса теплоотдачи, а также любой другой теплогидравлической аномалии (например, начала кипения для реакторов некипящего типа) должна быть надежно обеспечена в условиях, когда существующими контрольно-измерительными средствами эти теплогидравлические режимы принципиально не могут быть обнаружены. В [7], например, отмечается, что разработка методов раннего обнаружения аварийных теплогидравлических процессов в ТВС на основе шумовой диагностики ЯР, является одной из наиболее важных проблем, подлежащих решению при создании диагностических компьютерных систем на основе методологии ИИ в структуре технических средств СПО АЭС нового поколения.

В контексте сформулированных задач в работе [8] предложен подход к комплексному решению диагностических и верификационных задач. При этом алгоритм идентификации нижней границы пузырьковой структуры двухфазного потока в ТВС, рассмотренный в [8], разработан в качестве диагностического модуля специализированной

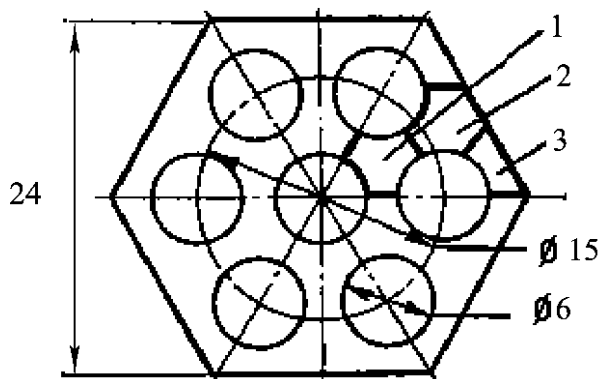


Рис. 1. Сечение экспериментального участка.
Ячейки: 1 – центральная; 2 – боковая; 3 – угловая.

ЭС [9], которая предназначена для функционирования в структуре перспективного компьютерного комплекса СПО АЭС.

В контексте диагностической концепции, изложенной в [9], а также с учетом особенностей верификации КТП в ТВС водоохлаждаемых ЯР необходимо обратить внимание на следующие принципиальные обстоятельства. Во-первых, в настоящее время можно считать установленным, что нарушения эксплуатационных режимов в оборудовании ядерных энергоблоков и их аномальные эксплуатационные режимы, включая аварийные теплогидравлические процессы в ТВС, в первую очередь, кризисы теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ являются вероятностными физическими явлениями, причем флуктуационные составляющие сигналов режимных параметров процесса теплообмена (давления, температуры, расхода и др.) являются стохастическими процессами. Следовательно, решение задачи идентификации тех случайных процессов и объектов, которые характеризуют параметры этих нарушений, принципиально может быть обеспечено на основе методов распознавания [9, 10, 11], разработанных на основе концепции ИИ [12]. Во-вторых, ряд базовых физических моделей, корреляций и замыкающих соотношений, реализованных в указанных кодах улучшенной оценки, как это отмечается, в частности, в (13 – 14), основывается на физических представлениях о теплогидравлических процессах более чем тридцатилетней давности.

Анализ работ по кризису теплоотдачи при кипении в пучках стержней [3] показывает, что из-за

неравномерности распределения теплогидравлических параметров потока по сечению обогреваемых стержневых сборок, кризисные условия первоначально возникают лишь в отдельных, горячих ячейках.

Результаты прямого измерения распределения теплогидравлических параметров теплоносителя по сечению пучка стержней, полученные в работе [15], могут быть использованы при оценке существующих методов расчета параметров потока по ячейкам [16] и зависимостей для расчета в стержневых сборках [17-21].

С учетом сформулированных проблемных задач в настоящей работе:

1. Выполнено исследование локальных значений параметров потока по ячейкам пучка при увеличении тепловых нагрузок вплоть до кризиса теплоотдачи, а также проведен анализ состояния исследований КТП с оценкой различных подходов к обобщению экспериментальных данных.

2. Представлены результаты разработки алгоритмов распознавания КТП в ТВС на основе ИНС.

В настоящей работе был исследован рабочий участок, представляющий собой пучок из семи стержней диаметром 6 мм, длиной 1,3 м, помещенный внутрь шестигранного вытеснителя размером 24 мм. Обогрев пучка (равномерный по длине и сечению) осуществлялся на длине 1 м. Сечение канала условно разбивалось на ячейки, из которых выделялись три характерные: центральная, боковая и угловая (рис. 1). Кризис теплоотдачи фиксировался автоматически по скачку температуры стенки любого из стержней на 20...30 °С. Методика и техника проведения экспериментов по исследованию распределения параметров теплоносителя по сечению пучка рассмотрены в работе [15].

Поскольку не представлялось возможным исследовать распределение параметров потока в пучке в момент возникновения кризиса теплоотдачи, значения массовой скорости и расходного паросодержания теплоносителя в ячейках ρw_i и x_i получали в предкризисных режимах. Среднее в пучке паросодержание \bar{x} отличалось от его критического значения $x_{кр}$ на 0,025...0,05.

Значения массовой скорости и энтальпии теплоносителя в ячейках в момент наступления кри-

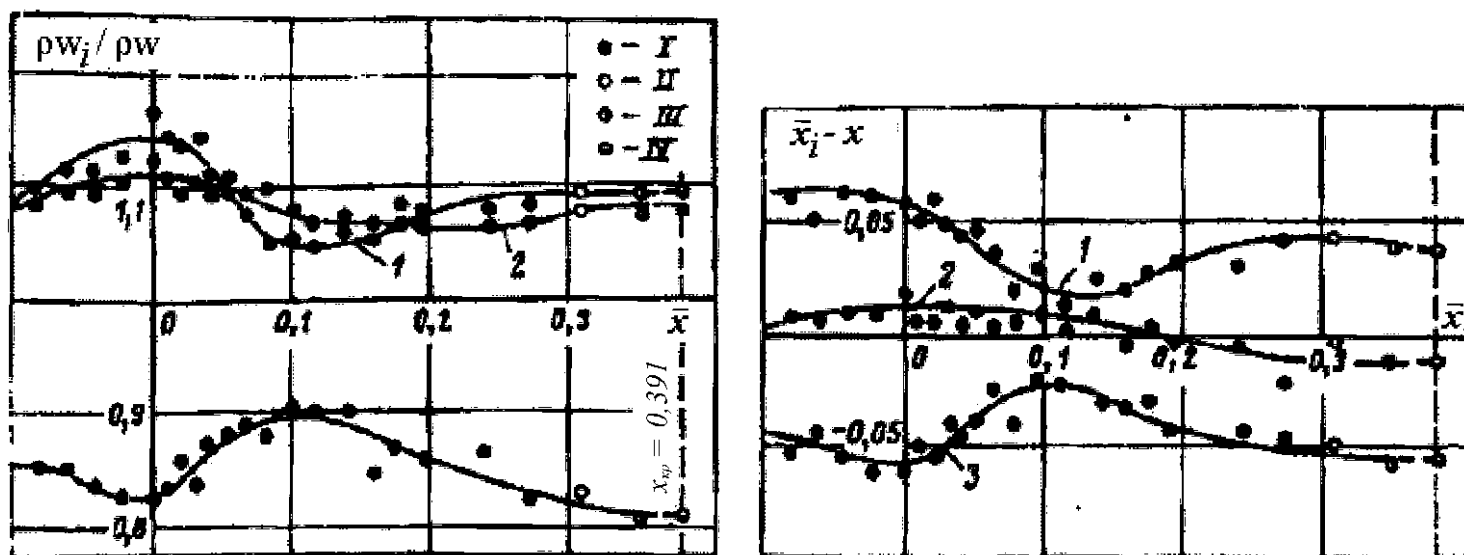


Рис. 2. Распределение массовой скорости и относительной энтальпии по ячейкам пучка при $p = 6$ МПа, $\rho w = 1500$ кг/(м²·с). I – $q = 1,5$ МВт/м²; II – 1,75; III – 2; IV – 2,14; 1–3 – номера ячеек.

зиса получали путем экстраполяции кривых на графиках $\rho w_i / \rho w = f(x)$ и $(\bar{x}_i - x) = f(x)$ в сторону увеличения x до $x_{кр}$ (рис. 2). Если кризиса теплоотдачи не удавалось достичь при постоянной тепловой нагрузке $q = \text{const}$ и переменной энтальпии воды на входе $i_{ex} = \text{var}$, графики строились по данным, полученным при $t_{ex} = \text{const}$ и $q = \text{var}$. Правомерность представления на одном графике данных при различных значениях q обусловлена тем, что согласно [16], а также нашим исследованиям изменение тепловой нагрузки даже на 50% при прочих равных условиях практически не оказывает влияния на распределение теплогидравлических параметров теплоносителя по сечению пучка стержней в области положительных значений x .

Всего был зафиксирован 31 кризис теплоотдачи при кипении в диапазоне $\rho w = 300 \dots 2000$ кг/(м²с), $p = 6,0 \dots 14,0$ МПа, $q_{кр} = 0,3 \dots 2,34$ МВт/м² (при $p = 6,0$ МПа – 7, при $p = 9,0$ МПа – 13 и при $p = 14,0$ МПа – 11 значений $q_{кр}$).

Термопары, фиксирующие усредненную по периметру температуру стержней, не позволяли экспериментально определить ячейку, в которой возникал кризис. Вместе с тем результаты измерения параметров потока в ячейках канала и фиксация стержней, на которых возникал кризис (9 раз на центральном стержне, 7 раз одновременно на центральном и периферийном, в ос-

тальных случаях – на периферийном), позволяют выделить центральную ячейку как наиболее опасную с точки зрения возникновения кризиса теплоотдачи. Рассчитанные по рекомендациям [22] $q_{кр}^{яч}$ во всех исследованных режимах имеют минимальные значения в центральной ячейке.

На рис. 3 представлены результаты сопоставления опытных данных по кризису теплоотдачи в центральной ячейке с данными для труб [22] как наиболее полно исследованной формы канала. Поводом к такому сопоставлению послужило отсутствие у исследователей единого мнения о возможности распространения зависимостей для расчета $q_{кр}$ в каналах простой формы на пучки стержней. Авторы [23, 24] считают, что в пределах исследованных ими режимных параметров (18...21 МПа) можно рассчитывать $q_{кр}$ в пучках стержней по зависимостям для труб. Авторы [19–21] высказывают мнение о том, что кризис кипения в пучке можно рассчитывать по зависимостям для труб только в случае равенства единице предложенных ими коэффициентов неравноценности “горячих” ячеек. Авторы [17, 25] говорят о необходимости разработки специальных зависимостей для определения КТП в “горячей” ячейке.

На рис. 3, а, б приведены зависимости $q_{кр} = f(x)$ для двух режимов, показывающие, что характер зависимости КТП в ячейке пучка стержней от режимных параметров соответствует характеру зави-

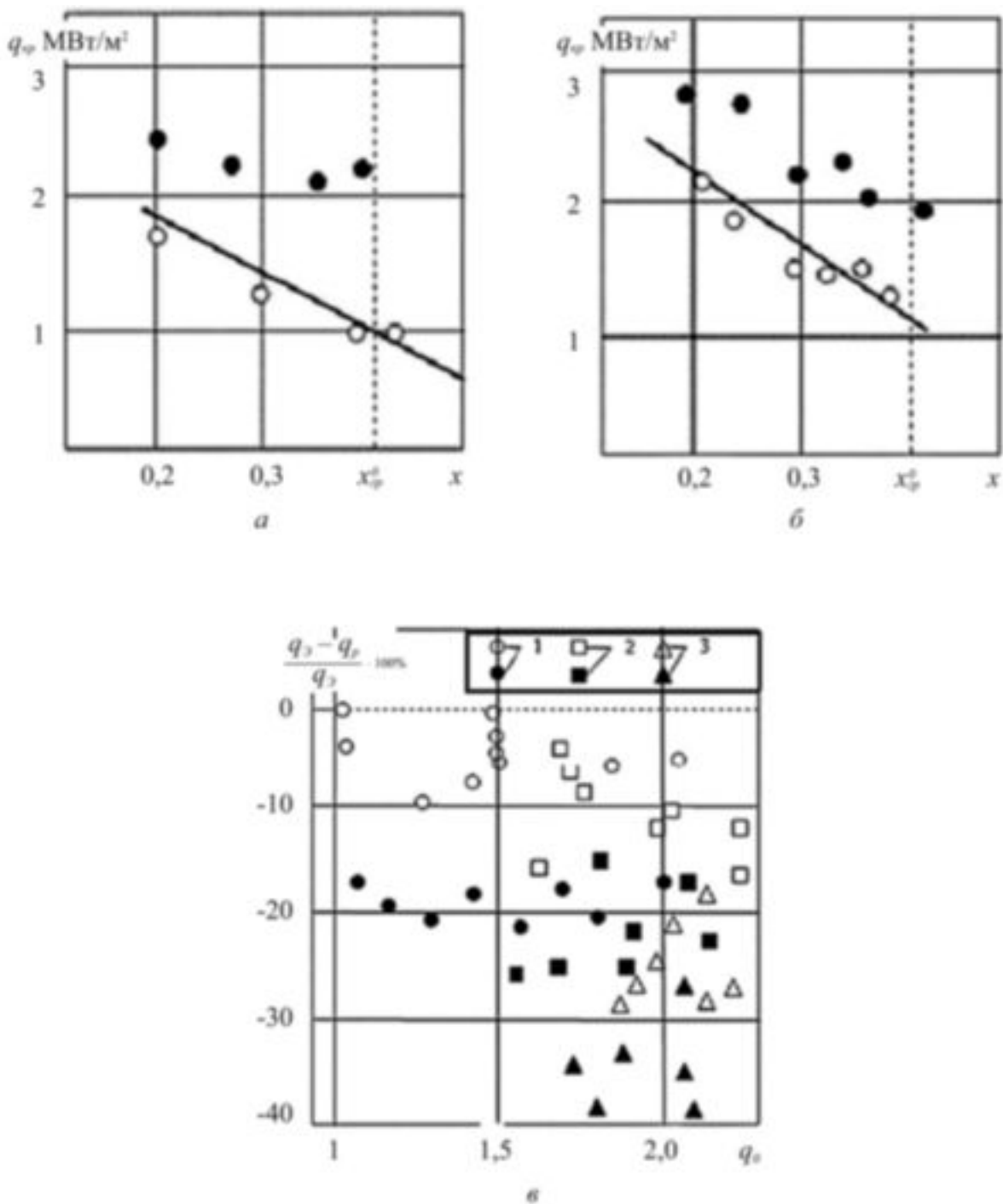


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных значений критического теплового потока q_{cr}^2 с расчетными q_{cr}^p , рекомендованными для труб [22]. *а* – $\rho w = 1000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$, $p = 14 \text{ МПа}$;
б – 1500, 14; *в* – $\rho w = 750\text{-}2000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$; 1 – $p = 14 \text{ МПа}$; 2 – $p = 9 \text{ МПа}$; 3 – $p = 6 \text{ МПа}$
 (светлые точки – расчет по данным [22]; темные точки – расчет на основе RELAP-5 MOD 3).

симости для труб (штриховыми линиями показаны значения граничного паросодержания x_{cr}^0).

Сопоставление значений q_{cr} в ячейке и в трубе показало, что при высоком давлении ($p = 14,0 \text{ МПа}$)

отличие ячейки стержневой сборки от трубы практически не сказывается на КТП; с уменьшением давления $q_{кр}$ в ячейке уменьшается по сравнению со значениями, рекомендованными для труб, и при $p = 6,0$ МПа разница между ними составляет 20...30% (рис. 3, в).

Сопоставление указанных экспериментальных значений критического теплового потока, полученных в “горячей” ячейке ТВС с соответствующими значениями КТП, которые были рассчитаны на основе экспериментальных корреляций, реализованных в коде RELAP-5 / MOD3 применительно к условиям теплогидравлически эквивалентного цилиндрического канала, показало следующее. В области высоких давлений при $p = 14,0$ МПа отличие критических плотностей теплового потока, экспериментально полученных в стержневой сборке, от соответствующих расчетных данных для трубы, обеспечиваемых верифицируемым кодом, находится на уровне примерно 25%, причем RELAP-5 / MOD 3 дает завышенные значения КТП. При снижении давления в ТВС эти различия возрастают: при $p = 6$ МПа значения КТП, рассчитанные на основе кода RELAP-5 / MOD 3, завышены относительно данных эксперимента на 40...50 %.

Полученное соотношение КТП в трубах и элементарных ячейках пучков стержней, а также влияние на него абсолютного давления, по-видимому, обусловлено такими же факторами, воздействие которых приводит к отличию значений $q_{кр}$ в трубах и кольцевых каналах [26]. Во-первых, специфика формы элементарных ячеек предполагает наличие сравнительно узких мест в зазорах между стержнями. Близкое расположение обогреваемых стенок в них способствует образованию паровых включений, соизмеримых с шириной зазора, и снижению критической плотности теплового потока в области низких давлений. С ростом же давления вероятность образования таких паровых включений снижается вследствие уменьшения удельного объема пара. Во-вторых, при положительных паросодержаниях проявляется влияние касательных напряжений на границе раздела жидкой и паровой фаз, понижающее критический тепловой поток на выпуклых поверхностях по сравнению с вогнутыми. По аналогии с кольцевыми каналами можно напомнить результаты опытов с двусторонним обогревом, которые показали, что при $x > 0$ кризис теплоотдачи

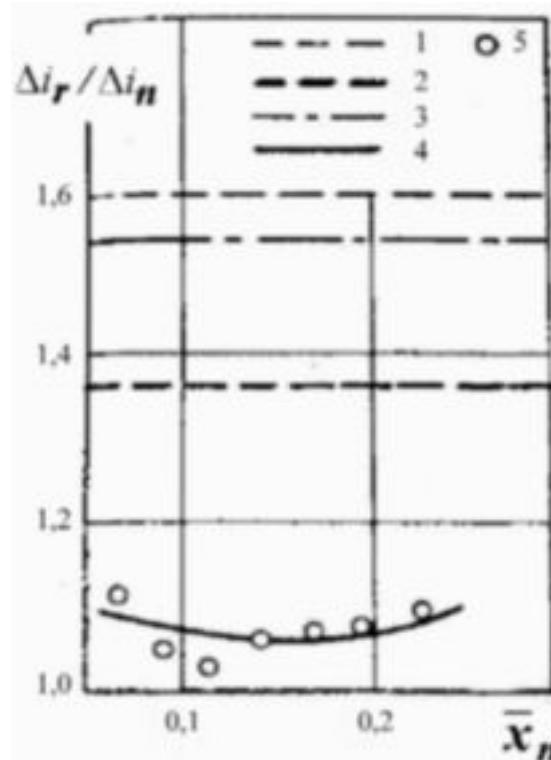


Рис. 4. Сопоставление опытных значений относительного прироста энтальпии теплоносителя в “горячей” ячейке Δi_r с рассчитанными по различным методикам. 1 – [4, 7]; 2 – [3]; 3 – [5, 6]; 4 – программа “Пучок 2С” по данным работы [17]; 5 – эксперимент.

возникает сначала на внутренней поверхности [27, 28]. С увеличением давления влияние последнего фактора также снижается вследствие уменьшения поверхностного натяжения на границе раздела жидкой и паровой фаз.

Полученные данные были также использованы для анализа эмпирических поправок, учитывающих неравномерность подогрева теплоносителя по ячейкам стержневой сборки при расчете КТП. На рис. 4 показано сопоставление опытных значений отношения прироста энтальпии теплоносителя по длине канала в “горячей” центральной ячейке Δi_r к среднему Δi_n с рассчитанными по [17-21] для типичного режима: массовая скорость $\rho w = 1000$ кг/(м²с), давление $p = 6,0$ МПа, плотность теплового потока $q = 1$ МВт/м². Из рисунка видно, что определенная опытным путем неравномерность распределения теплогидравлических параметров пароводяного потока по сечению пучка значительно отличается от рас-

считанной с поправками; энтальпия в “горячей” ячейке существенно ближе к среднепучковой, чем к рассчитанной с поправками.

Характерно, что сравнение опытных значений $q_{кр}$ с рассчитанными по формулам с этими поправками дало неудовлетворительные результаты. Так, погрешности расчета по формуле [17] составили $\Delta_N = -42,0\%$ и $\sigma_N = 26,0\%$ (для 87% опытных точек), по формуле [18] – соответственно 33,2 и 21,8% для 57% опытных точек (число точек ограничивалось рекомендованными для этих формул диапазонами параметров).

Расчет по формулам, базирующимся на усредненных по сечению параметрах, показал существенно лучшие результаты: с помощью формул [29, 30] вполне удовлетворительно удалось описать 57% данных. Средние арифметическая и квадратичная ошибки составили для первой формулы 3,6 и 10,8%, для второй – 0,5 и 12,4%. Тем не менее следует отметить очевидность неперспективности метода расчета КТП в пучках стержней по зависимостям, использующим средние по сечению параметры, поскольку отличие параметров “горячей” ячейки от средних по сечению может быть значительным.

Как видно из рис. 4, программный комплекс “Пучок 2С”, обеспечивающий двумерное решение задачи распределения параметров потока по сечению пучка, в отличие от одномерных поправок удовлетворительно описывает данные локальных измерений в “горячей” центральной ячейке исследованной стержневой сборки. Такие же результаты были получены и для остальных ячеек пучка [31].

Использование результатов локальных измерений параметров потока по сечению пучка позволило удовлетворительно описать опытные данные по кризису теплоотдачи расчетной зависимостью, предложенной в работе [17] для режимов пузырькового движения пароводяной смеси и движения кипящей пленки в кольцевом режиме. При этом поправка на неравномерность распределения параметров потока была исключена, а средние значения массовой скорости и энтальпии заменялись их опытными значениями в “горячей” центральной ячейке. Средние арифметическая и квадратичная ошибки для 87% опытных точек составили 2,5 и 22%.

Таким образом, представляется возможным при вычислении критического теплового потока

в стержневых сборках определять локальные значения параметров потока в ячейках по расчетной теплогидравлической программе “Пучок 2С”.

Контроль температурных режимов теплоотдающей поверхности, выполнявшийся в процессе экспериментов, подтвердил, что все характерные фазы перехода теплоотдающей поверхности от конвективной теплоотдачи к режиму пузырькового кипения и далее вплоть до КТП однозначно характеризуются параметрами автоспектральной плотности (АСП) гидроакустического сигнала в кипящей жидкости [9–11].

Верификация КТП в пучке стержней с использованием признаков пространства АСП сигналов акустического шума в потоке кипящего теплоносителя [11] в сочетании с компьютерной реализацией алгоритмов автоматического распознавания на основе методологии ИНС [12–14] этой физически нечеткой (в силу ее вероятностной природы) верхней границы пузырьковой структуры двухфазного потока в ТВС до настоящего времени, судя по опубликованным работам, не выполнялась.

Фиксация КТП в сборке обеспечивалась акустическими измерениями [9–11] и контролировалась по температурным режимам обогреваемых поверхностей в конце обогреваемой длины пучка.

Сигналы датчиков динамического давления, установленного в верхней и нижней камерах экспериментальной ТВС, записывались на магнитную ленту измерительного магнитографа Н-046. Зарегистрированные сигналы в режиме воспроизведения подавались на входы цифрового спектроанализатора “Bruel&Kjaer-2133”, вычислявшего оценки АСП в 1/3 октавных спектральных полосах в диапазоне частот $\Delta f = 0,1 \dots 1000,0$ Гц, а также спектроанализатора СК4-3 с фотоприставкой. Цифровой выход спектроанализатора соединялся с входным портом персонального компьютера IBM PC.

Задача идентификации режимов пузырькового кипения в ТВС, включая кризис теплоотдачи, формулируется как распознавание этих режимов на основе случайных параметров АСП акустического шума, измеренного в описанной экспериментальной ТВС (в данной работе представлены результаты измерений сигналов динамического давления в ее верхней камере). Совокупность распознаваемых теплогидравлических

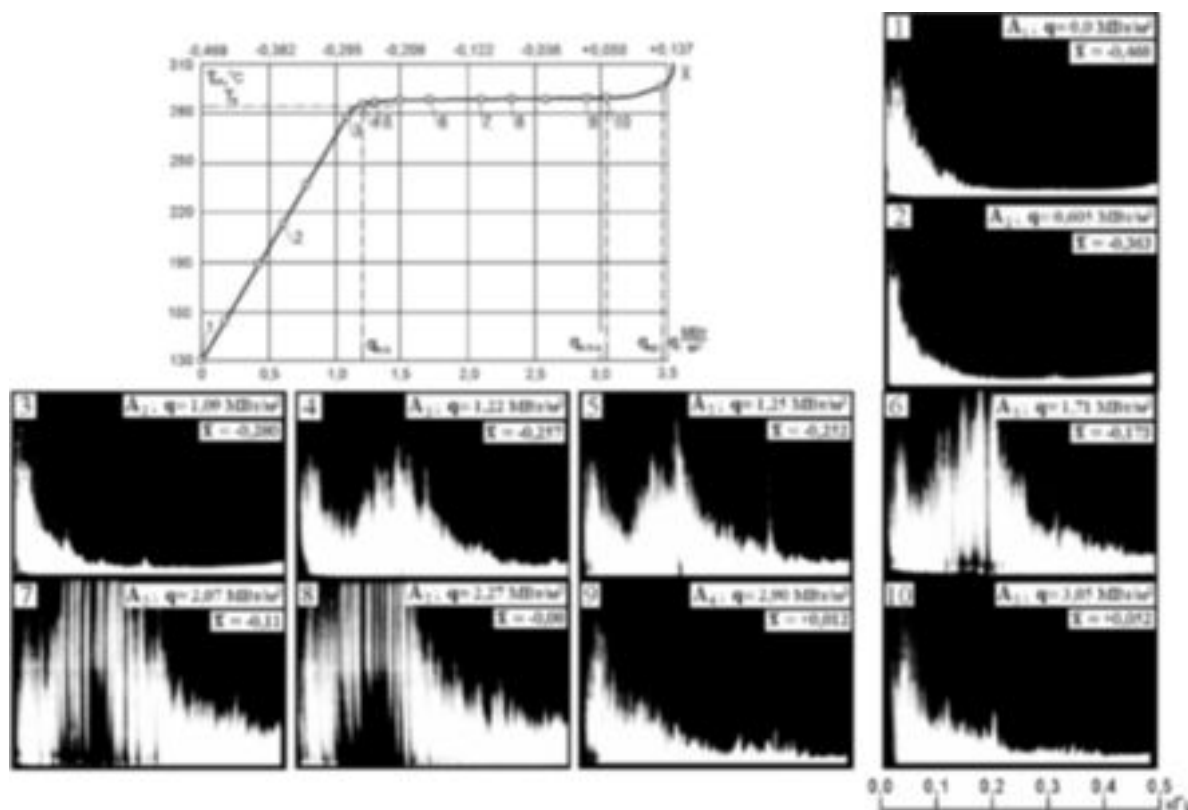


Рис. 5. Результаты синхронной регистрации температуры стенки в выходном сечении экспериментального участка и АСП акустического шума для пяти распознаваемых теплогидравлических режимов при значении параметров процесса: $P = 6,86$ МПа, $\rho_w = 2000$ кг/(м²с), $\Delta T_{нед}^{ex} = 154$ °С
 \bar{x} – среднее массовое паросодержание.

режимов A_i , $i = 1, 2, \dots, M$ образует множество распознаваемых классов $\mathbf{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$, каждый элемент которого является определенным типом теплогидравлического режима. В рассматриваемой модели распознавания таких классов теплогидравлических режимов пять: A_1 – конвекция; A_2 – начало кипения; A_3 – развитое пузырьковое кипение; A_4 – режим, непосредственно предшествующий кризису теплоотдачи и соответствующий плотностям теплового потока $q = (0,9 \dots 0,95) q_{кр}$; A_5 – кризис теплоотдачи, т.е. в рассматриваемой системе обозначений $M = 5$.

Каждое конкретное состояние диагностируемой ТВС характеризуется совокупностью \mathbf{V}_j , $j = 1, 2, \dots, T$ ($T \gg M$) случайных АСП акустического шума и образует подлежащее распознаванию множество $\mathbf{V} = \{V_1, V_2, \dots, V_T\}$. Элемент множества \mathbf{V} характеризуется совокупностью признаков теплогидравлического режима ТВС, которыми являются параметры АСП акустического шума. Указанная

совокупность признаков теплогидравлических режимов образует соответствующее множество $\mathbf{X}_N = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, причем каждая конкретная реализация множества \mathbf{X}_N представляется в виде случайного N – мерного вектора. Множество признаков \mathbf{X}_N , которыми описываются объекты множества \mathbf{V} характеризует N мерное пространство признаков, в котором объекты классов \mathbf{A} занимают некоторые области. При дискретном рассмотрении признаков для каждого из них x_k существует совокупность градаций $l = 1, 2, \dots, R$, которая образует множество $a_{11}r^2 + 2a_{12}rz + a_{22}z$.

В качестве примера информационной значимости спектральных параметров АСП акустического шума в исследованном диапазоне параметров процесса теплоотдачи на рис. 5 представлены результаты синхронной регистрации температурного режима продольно-омываемой стержневой сборки электрообогреваемых имитаторов ТВЭЛ.

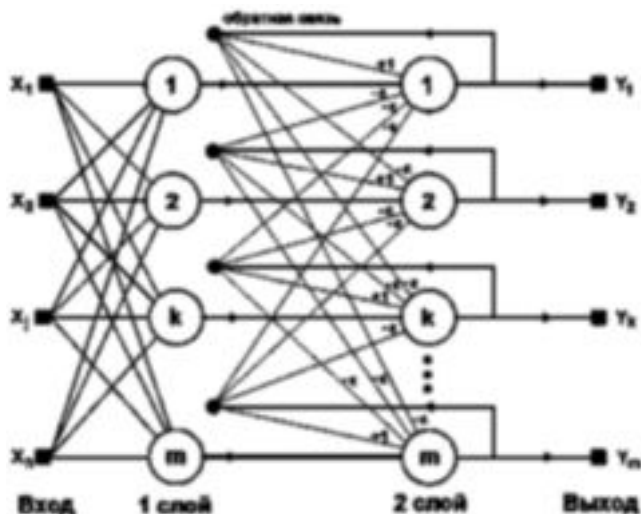


Рис. 6. Структурная схема сети Хэмминга.

С учетом изложенного решаемая в настоящей работе задача распознавания случайных объектов АСП акустического шума для пяти указанных теплогидравлических режимов – формулируется следующим образом:

- каждый из теплогидравлических режимов $A_i, i = 1, 2, \dots, M$, описываемых множеством X_N диагностических признаков, представленных, например, в бинарной форме, занимает в N – мерном пространстве признаков некоторую область;
- номер $i \in M$ области в указанном N – мерном пространстве признаков подлежит автоматическому распознаванию.

Известно [13], что методология ИНС как область нейроинформатики в теории ИИ [12] принципиально обеспечивает разработку интеллектуальных алгоритмов распознавания случайных объектов средствами математического моделирования нейрофизиологических процессов, аналогичных тем, которые происходят в нейронах – нервных клетках живых существ. При этом многослойные нейрокомпьютерные сетевые модели, являясь системами параллельной обработки информации, принципиально обладают способностью не только к обучению и распознаванию, но также и к обобщению накопленных знаний.

В контексте сформулированной задачи распознавания в настоящей работе реализована ИНС Хэмминга [14], состоящая из двух слоев (рис. 6). Первый и второй слои имеют по m нейронов, где m – число образцов. Нейроны первого слоя

имеют по n синапсов, соединенных со входами сети (образующими фиктивный нулевой слой). Нейроны второго слоя связаны между собой ингибиторными (отрицательными обратными) синаптическими связями. Единственный синапс с положительной обратной связью для каждого нейрона соединен с его же аксоном.

Идея работы сети состоит в нахождении расстояния Хэмминга от тестируемого образа до всех образцов. Расстоянием Хэмминга называется число отличающихся битов в двух бинарных векторах. Сеть должна выбрать образец с минимальным расстоянием Хэмминга до неизвестного входного сигнала, в результате чего будет активизирован только один выход сети, соответствующий этому образцу.

На стадии инициализации весовым коэффициентам первого слоя и порогу активационной функции присваиваются следующие значения:

$$w_{ik} = \frac{x_i^k}{2}, \quad i=0 \dots n-1, \quad k=0 \dots m-1,$$

$$T_k = n / 2, \quad k = 0 \dots m-1.$$

Здесь x_i^k – i -ый элемент k -ого образца.

Весовые коэффициенты тормозящих синапсов во втором слое берут равными некоторой величине $0 < \epsilon < 1/m$. Синапс нейрона, связанный с его же аксоном, имеет вес $+1$.

Алгоритм функционирования сети Хэмминга следующий:

1) На входы сети подается неизвестный вектор $X = \{x_i; i=0 \dots n-1\}$, исходя из которого рассчитываются состояния нейронов первого слоя (верхний индекс в скобках указывает номер слоя):

$$y_j^{(1)} = s_j^{(1)} = \sum_{i=0}^{n-1} w_{ij} x_i + T_j, \quad j=0 \dots m-1.$$

После этого полученными значениями инициализируются значения аксонов второго слоя:

$$y_j^{(2)} = y_j^{(1)}, \quad j = 0 \dots m-1$$

2) Вычислить новые состояния нейронов второго слоя:

$$s_j^{(2)}(p+1) = y_j^{(2)}(p) - \epsilon \sum_{k=0}^{m-1} y_k^{(2)}(p), \quad k, j=0 \dots m-1$$

и значения их аксонов:

$$y_j^{(2)}(p+1) = f \left[s_j^{(2)}(p+1) \right], \quad j=0 \dots m-1.$$

Функция активации f имеет вид сигмоидального порога, причем ее максимальное значение F должно быть достаточно большим, чтобы любые возможные значения аргумента не приводили к насыщению.

3) Проверить, изменились ли выходы нейронов второго слоя за последнюю итерацию. Если да – перейди к шагу 2. Иначе – останов программы.

На основе рассмотренной модели ИНС Хэмминга выполнено распознавание АСП акустического шума с использованием 28-ти спектральных признаков, каждый из которых имел 70 градаций спектральной интенсивности для пятиэлементного множества $A_1 - A_5$. Получена надежность правильной идентификации каждого из этих теплогидравлических режимов в ТВС, близкая к 100 %.

В процессе проведения экспериментальных исследований кризисов теплоотдачи в рассмотренной ТВС в некоторых экспериментальных режимах (при определенных значениях p , ρw , $i_{вх}$) в ряде случаев был обнаружен факт пережога поверхности ТВЭЛ при значениях q , существенно меньших (в 2...3 раза), расчетной величины $q_{кр}$, определяемой на основе кода RELAP-5 / MOD 3. Исследование параметров АСП акустического шума в экспериментальной ТВС подтвердило, что указанные аномально низкие значения $q_{кр}$ были достигнуты в режиме ТАК [32–37]. С учетом отмеченного влияния ТАК на $q_{кр}$ и особенностей развития теплогидравлических процессов в экспериментальной ТВС к указанному пятиэлементному множеству $A_1 - A_5$ был добавлен класс A_6 , который соответствует кризису теплоотдачи в парогенерирующем канале в условиях высокочастотной колебательной неустойчивости.

Таким образом, в настоящей работе был рассмотрен также и другой аспект проблемы верификации кризисов теплоотдачи в кипящих каналах. В дополнение к изложенному в работе были поставлены следующие задачи:

1. Обнаружить эффект влияния ТАК в КА на условия повреждения теплоотдающей поверхности, факт разрушения которой в ряде случаев может быть ошибочно принят за наступление кризиса теплоотдачи.

2. Показать, что влияние ТАН на теплоотдачу с поверхности ТВЭЛ может быть весьма существенным, хотя ни один из существующих теплогидравлических кодов это влияние принци-

пиально не учитывает и не предусматривает возможности предсказания ТАК.

Исследования ТАК в ПГ каналах в условиях вынужденного движения теплоносителя, выполненные в последние три десятилетия в связи с запросами ряда областей новой техники, показали, что процесс кипения на теплоотдающей поверхности при определенных условиях сопровождается интенсивными полигармоническими колебаниями давления двухфазного потока звукового диапазона частот, амплитуды которых могут достигать значений, составляющих 50...100 % и более от величины статического давления теплоносителя в канале, и являться непосредственной причиной разрушения КА [32]. В настоящее время ТАН ПГ каналов рассматривается [33] в качестве одного из главных факторов, ограничивающих форсирование мощности и создание новых типов теплообменных устройств. Вместе с тем ТАН в двухфазных потоках продолжает оставаться одним из наименее изученных видов теплогидравлических колебательных процессов в ПГ каналах. Известно, что математические модели ТАН, такие, например, как [34], в основу которых положены передаточные функции кипящего канала, рассматриваемого как колебательная система с обратными связями, предназначены только для предварительной априорной оценки предполагаемых границ возможного возникновения этих полигармонических колебаний давлений высокой интенсивности. С другой стороны, компьютерная оперативная диагностика ТАН [36, 37], реализуемая непрерывно в процессе эксплуатации теплообменного устройства, ставит своей задачей надежное обнаружение начальных фаз ТАК и недопущение развития этого вида гидродинамической колебательной неустойчивости.

В настоящей работе экспериментальное исследование динамики возникновения и развития ТАК на основе анализа частотной структуры АСП акустического шума в ПГ канале, а также разработка метода автоматического распознавания областей ТАН выполнены в каналах кольцевой геометрии: $(20 \times 10) \cdot 10^{-3}$ м с длиной обогрева $\ell_{об} = 0,12$ м (ПГ канал №1) и $(14 \times 10) \cdot 10^{-3}$ м с $0,60$ м (ПГ канал №2), – в диапазонах низких (давления $p = 0,098...0,98$ МПа; массовые скорости $\rho w = 500...5000$ кг/м²с, входного недогрева $\Delta t_{нед}^{вх} = 0...100$ К) и высоких ($p = 0,98...9,8$ МПа;

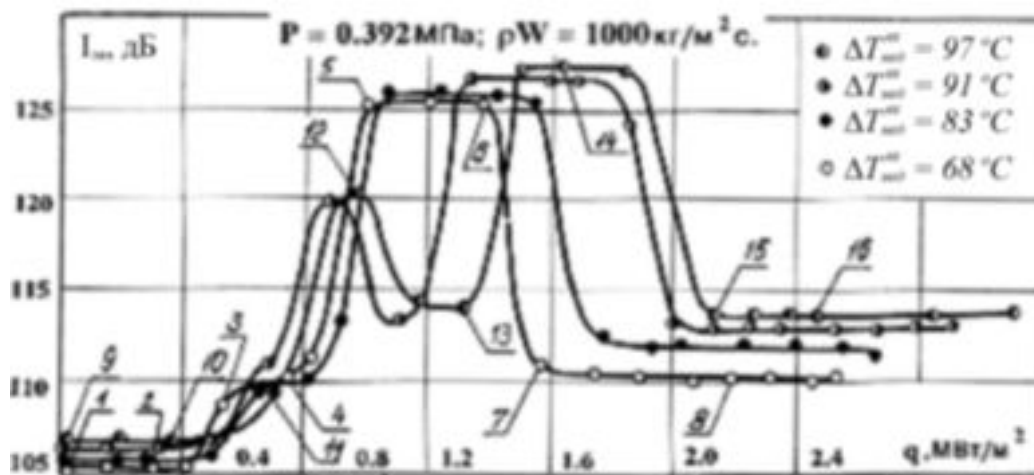


Рис. 7. Влияние $\Delta T_{нед}$ на области ТАН в ПГ канале №1.

$\rho w = 500 \dots 2500 \text{ кг/м}^2\text{с}$, $\Delta t_{нед}^{6x} = 0 \dots 100 \text{ К}$) параметров потока. Каждый канал образован наружным цилиндрическим кожухом и коаксиальным тепловым имитатором ТВЭЛ – трубой из нержавеющей стали 1x18Н10Т с толщиной стенки 0,5 мм указанных диаметра и длины. Приемная поверхность высокотемпературных измерительных гидрофонов, установленных в наружном цилиндрическом кожухе каждого из кольцевых каналов, имеет непосредственный контакт с теплоносителем. Описание экспериментального стенда, характеристики гидрофонов и методика экспериментов рассмотрены в работах [36, 37]. Во всех экспериментах, проводившихся в условиях p , ρw , $\Delta t_{нед}^{6x} = \text{const}$ и $q = \text{var}$, осуществлялась синхронная регистрация t_{cm} обогреваемого трубчатого элемента в его выходном кризисном сечении, а также измерение АСП акустического шума и его интегральной интенсивности $I_{зв}$ во всех подлежащих автоматическому распознаванию классах теплогидравлических режимов ПГ канала: A_1 – конвекции, A_2 – начале кипения, A_3 – развитом пузырьковом, A_4 – нестабильном пленочном кипении, A_5 – кризисе теплоотдачи, а также A_6 – режиме ТАН.

Согласно данным работ [35, 36], а также [37], в которой представлены результаты синхронной регистрации температуры поверхности рабочего элемента $t_{cm} = \varphi(q)$ и $I_{зв} = \varphi(q)$ в ПГ канале №1, кипящий участок с тепловым имитатором ТВЭЛ в режиме развитого пузырькового кипения отделен от остальных участков контура циркуляции границами отражения акустических колеба-

ний с различными значениями волновых сопротивлений. Известно [32], что акустические колебания в трубе с границами отражения на ее концах возможны только на дискретном гармоническом ряде собственных резонансных частот $f_n = nc / (2L)$, где $n = 1, 2, 3, \dots$ – порядковый номер гармоники колебания; L – длина трубы, c – скорость звука. Как следует из данных экспериментов [36, 37], парогенерирующий канал, подобно резонатору типа “узкая труба”, в широкополосном шуме развитого пузырькового кипения выделяет и резонансно усиливает колебания на его собственных резонансных частотах. С ростом паросодержания в канале, которое наблюдается при последующем наращивании q , изменяется значение скорости звука c в парожидкостном столбе, а, следовательно, изменяются и его резонансы. В результате дальнейшего роста q , увеличения паросодержания и изменения скорости звука в парожидкостном потоке значения возможных резонансных колебательных частот выходят за границы частотной полосы спектра шума кипения и акустические резонансы парожидкостного столба становятся невозможными. При этом конкретные условия резонанса парожидкостного столба в определенном диапазоне паросодержаний потока определяются сочетанием режимных параметров процесса p , ρw , $\Delta t_{нед}$. В развитие изложенной резонансной модели ТАН на рис.7 представлено влияние недогрева теплоносителя на области ТАН ПГ канала №1, которые проявляют себя как зоны резонансного воз-

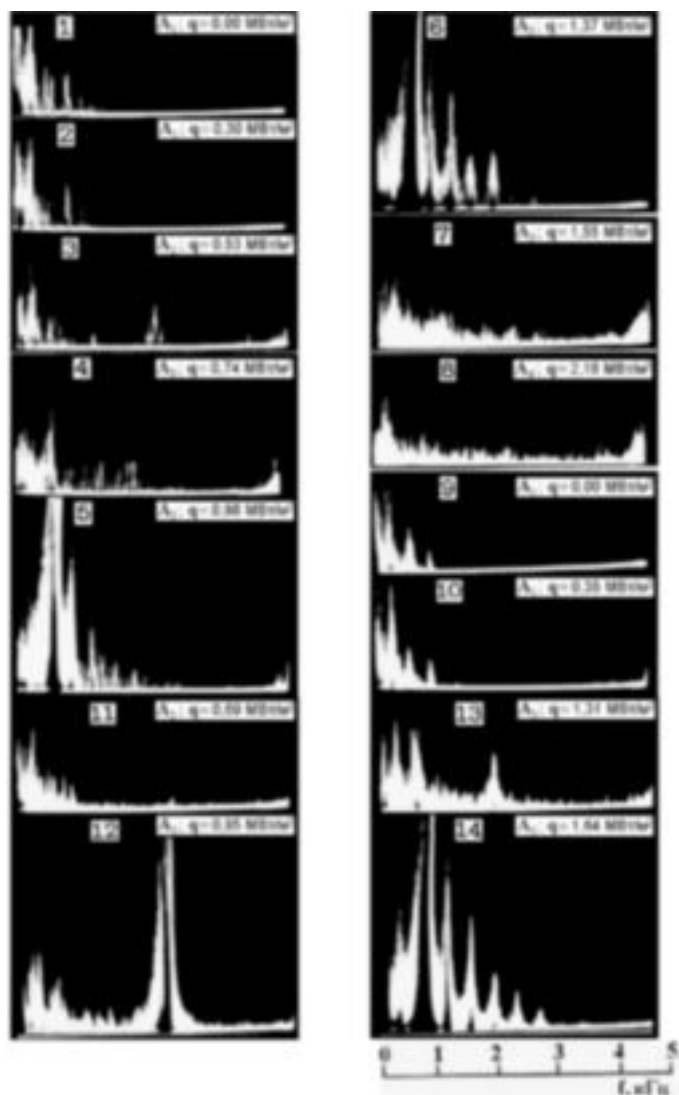


Рис. 8. Влияние недогрева теплоносителя на частотную структуру АСП акустического шума в ПГ канале.

растания $I_{3\sigma}$. Экспериментальным точкам с номерами на рис.7 соответствуют одноименные АСП, представленные на рис.8. Как следует из этих данных, во всех экспериментах с существованием полигармонических ТАК снижение $\Delta t_{нед}$ перемещает область ТАН в зону меньших тепловых потоков. При этом повышение температуры теплоносителя в ПГ канале, приводящее к росту паросодержания и, следовательно, увеличению сжимаемости двухфазного потока обуславливает достижение необходимых для параметрического усиления ТАК (за счет изменения скорости звука синхронно с колебаниями [36, 37]) значений паросодержания в зоне меньших тепловых потоков.

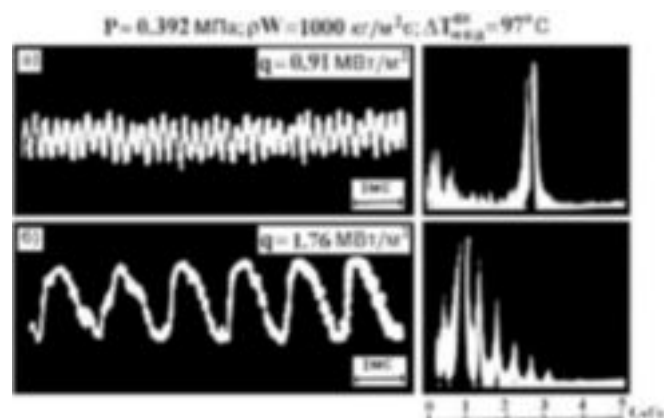


Рис. 9. Осциллограммы ТАК в режимах: прямого возбуждения ТАК (а), параметрического усиления ТАК (б).

Действительно, анализ данных, представленных на рис.7, 8, 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 резонансного колебания на процесс кипения в предстеночном слое теплоотдающей поверхности. На рис.9 представлены осциллограммы и соответствующие им АСП акустического шума для экспериментальных точек 12 и 14 на рис.7. Характерно, что первая из этих осциллограмм соответствует области прямого возбуждения ТАК как стоячей волны, когда парожидкостный столб в кипящем канале выделяет и резонансно усиливает колебания на его собственных резонансных частотах. Вторая из осциллограмм соответствует параметрическому усилению [36, 37] стоячей волны на более низких частотах в связи с ростом паросодержания потока.

Исходя из вышеизложенного, физически обоснованной представляется следующая модель динамики пристенного слоя кипящей поверхности, которая обуславливает механизм возможного разрушения кипящей поверхности в режиме пузырькового кипения в условиях описанного резонансного усиления ТАК. Повышение давления в пучностях стоячей волны приводит к снижению величин $q_{кр}$ (особенно в области высоких давлений) или подавлению процесса



Рис. 10. Характер разрушения ТВЭЛ в режимах ТАК.

кипения в пучностях стоячей волны (рис. 11 б) приводит к снижению интенсивности теплоотдачи в области локальных максимумов давления на теплоотдающей поверхности, которые воздействуют на пузырьковую структуру двухфазного пристенного слоя с частотой первой (или нескольких) наиболее интенсивных гармонических составляющих ТАК. Следствием снижения $q_{кр}$, а также подавления кипения в узлах стоячей волны является снижение интенсивности теплоотдачи, которая сопровождается ростом температуры кипящей поверхности в области максимума давления и интенсивным термоциклированием поверхности нагрева с частотой ТАК, которое обуславливает разрушение

кипящей поверхности. Результаты распознавания ИНС класса A_6 , соответствующего режиму ТАК, в котором были отмечены anomalously низкие значения $q_{кр}$, подтверждают обоснованность этой модели разрушения ТВЭЛ.

На рис.10 представлены фотографии теплоотдающих поверхностей ПГ каналов №№1, 2, иллюстрирующие характер их разрушения после наступления резонансных ТАК со следующими параметрами: а) – ПГ канал №1 $p = 0,294$ МПа; $\Delta t_{нед}^{6x} = 40$ К; $\rho_w = 2000$ кг/м³; $q = 1,7$ МВт/м², $q/q_{кр} = 0,33$; скорость звука $c = 54,86$ м/с; длина волны ТАК на поверхности ТВЭЛ $\lambda = 0,034$ м; расчетное значение частоты этой волны: $f = c/\lambda = 1613$ Гц; б) – ПГ канал №2 $p = 6,86$ МПа; $\Delta t_{нед}^{6x} = 84$ К; $\rho_w = 1000$ кг/м³; $q = 1,4$ МВт/м², $q/q_{кр} = 0,42$; скорость звука $c = 213,36$ м/с; длина волны 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; $f_2/f_1 = 5$.

На рис.11 представлены АСП зарегистрированные при разрушении указанных ТВЭЛ. Характерно, что для каждого из этих случаев расстояние между областями пережога на каждом из ТВЭЛ соответствует расчетной длине волны в экспериментальном канале и коррелируется с изложенной резонансной моделью ТАК.

Выводы

1. Результаты локальной верификации КТП в стержневой сборке ТВЭЛ свидетельствуют о существенном расхождении экспериментальных

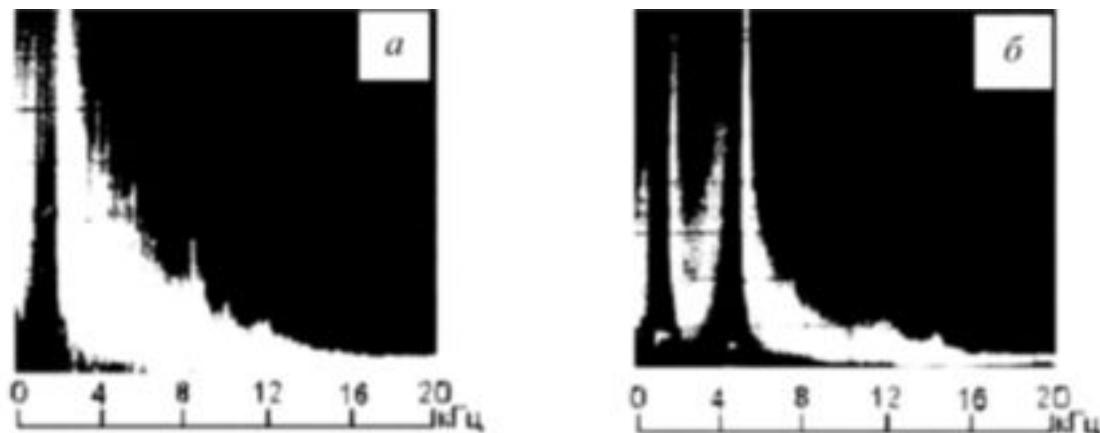


Рис. 11. Частотная структура АСП акустического шума при разрушении ТВЭЛ (а – ПГ канал №1, б – ПГ канал №2).

данных с расчетными значениями этого параметра, получаемыми на основе кода RELAP-5 / MOD 3 в области аварийных (низких) давлений.

2. Режимы ТАН в парогенерирующих каналах приводят к разрушению ТВЭЛ при существенно более низких, чем в отсутствие высокочастотной колебательной неустойчивости, значениях теплового потока.

3. Возможность определения режимов ТАН, представляющих реальную опасность с точки зрения возможности разрушения ТВЭЛ уже в режиме развитого пузырькового кипения, кодом RELAP-5 / MOD 3 не предусмотрена.

4. Методы нейроинформатики с использованием ИНС являются эффективным средством распознавания случайных диагностических сигналов и могут быть использованы не только в задачах диагностики оборудования АЭС, но и в задачах локальной верификации современных теплогидравлических кодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нигматулин Б.И., Мелихов О.И., Соловьев С.Л.* Состояние и развитие отечественных системных теплогидравлических кодов для моделирования аварийных и нестационарных процессов на АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика-2000. №3.-С.17-20.
2. *Мигров Ю.А., Соловьев С.Л.* Теплогидравлические расчетные коды нового поколения. Общая характеристика и перспективы развития // Теплофизические аспекты безопасности АЭС. Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация) / Сб. тез. док. конф. "Теплофизика - 2001", - Обнинск, 2001.
3. *Бобков В.П., Смогалева И.П.* О точности описания различными кодами критических тепловых потоков в пучках стержней // Теплоэнергетика. - 2001. №3. - С. 21-28.
4. *Абагян А.А., Воронин Л.М., Филимонцев Ю.Н.* Проблемные вопросы эксплуатации АЭС. // Материалы 2-й Международной конференции "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики", - Москва, ВНИИАЭС. - 2001. - с.49-52.
5. *Морозов В.И.* Приоритетные направления внедрения диагностического обеспечения на АЭС. - Атомная энергия. - 2000. - Т.88. - №4. - с.311-313.
6. *Корниенко К.А., Аркадов Г.В., Финкель Б.М., Усанов А.И.* Создание и внедрение систем диагностики на АЭС с ВВЭР. // Материалы 2-й Международной конференции "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики", - Москва, ВНИИАЭС. - 2001. - с.166-169.
7. *Калинушкин А.Е., Митин В.И., Семченков Ю.М.* Создание экспертных систем для ядерной энергетики. - Атомная техника за рубежом. - 1990. - №7. - с.3-12.
8. *Шараевский И.Г., Домашев Е.Д., Архипов А.П. и др.* Метод верификации начала вскипания теплоносителя в каналах ядерного реактора // Пром. теплотехника. - 2001. - т.23. - №4-5. - С.114-121.
9. *Шараевский И.Г., Письменный Е.Н., Домашев Е.Д. и др.* Возможности совершенствования компьютерных систем контроля АЭС на основе методов искусственного интеллекта. // Пром. теплотехника. - 2000. - Т.22. - №1. - с.70-77.
10. *Шараевский И.Г.* Метод распознавания начала вскипания теплоносителя в реакторе ВВЭР на основе байесовского классификатора нейронных шумов // Пром. теплотехника. - 1999. - Т.21. - №6. - с.69-75.
11. *Шараевский И.Г.* Распознавание режимов течения двухфазного потока в каналах ядерного реактора по шумам технологических параметров. // Пром. теплотехника. - 2000. - Т.22. - №1. - с.53-59.
12. *Luger G.* Artificial intelligence. Addison-Wesley UK, 2002.
13. *Cichocki A., Unbehauen R.* Neural networks for optimization and signal processing. N.Y.: Wiley, 1993.
14. *Lippmann R.* An introduction to computing with neural nets // IEEE ASSP Magazine, 1987, April. - pp. 4-22.
15. *Орнатский А.П., Маевский Е.М., Архипов А.П.* Исследование распределения массовой скорости и энтальпии теплоносителя по сечению семистержневого пучка. - Теплоэнергетика, 1981, № 10, с. 64-66.
16. *Лахи Р. Т., Ширалкар Б. С., Радклиф Д. В.* Распределение массовой скорости и энтальпии в пучке стержней для однофазного и двухфазного потоков. - Тр. амер. о-ва инж.-механиков. Сер. С, 1971, т. 93, № 2, с. 64-78.
17. *Смолин В. Н., Поляков В. К.* Методика расчета кризиса теплоотдачи при кипении теплоносителя

ля в стержневых сборках. - В кн.: Семинар ТФ-78. Теплофизические исследования для обеспечения надежности и безопасности ядерных реакторов водородяного типа. - Будапешт: 1978, т. 2, с. 475-486.

18. *Полянин Л. Н.* Расчет критической мощности тепловыделяющих каналов сложной формы. - Атомная энергия, 1977, т. 42, вып. 6, с. 457-460.

19. *Ефимов В. А.* Исследование кризиса кипения в модели пучка стержней. - Теплоэнергетика, 1966, № 1, с. 59-64.

20. *Ефимов В. А., Трутнев Д. П., Марченко Л. Д.* Изучение кризиса кипения воды в пучках стержней. - В кн.: Теплообмен, гидродинамика и теплофизические свойства веществ. - М.: Наука, 1968, с. 60-68.

21. *Исследование критических тепловых потоков в пучках стержней применительно к реакторам типа ВВЭР/ Ю. А. Безруков, В. И. Астахов, Л. А. Салий и др.* - В кн.: Семинар ТФ-74. Исследования критических тепловых потоков в пучках стержней. - М.: 1974, с. 57-66.

22. *Рекомендации по расчету кризиса теплоотдачи при кипении воды в круглых трубах.* - Препринт ИВТ АН СССР № 1-57: М., 1980-67 с.

23. *Зенкевич В.А., Субботин В.И., Троянов М.В.* Критические тепловые нагрузки при продольном смывании пучка трубок водой, недогретой до температуры насыщения. - Атомная энергия, 1958, т. 4, № 4, с. 370-372.

24. *Аладьев И.Т., Додонов Л.Д.* Критические тепловые потоки при кипении недогретой воды в каналах сложной формы (давление 100 ата). - В кн.: Конвективный и лучистый теплообмен. - М.: Изд-во АН СССР, 1960, с. 65-79.

25. *Мионов Ю.В., Сакович Е.В., Шпанский С.В.* Анализ гидродинамики и кризиса теплообмена в пучках гладких стержней с учетом неравномерности распределения теплогидравлических параметров по сечению канала. - В кн.: Семинар ТФ-74. Исследования критических тепловых потоков в пучках стержней. - М.: 1974, с. 189-200.

26. *Толубинский В.И.* Теплообмен при кипении. - Киев: Наукова думка, 1980. - 316 с.

27. *Беккер К., Хернборг Г.* Исследование условий возникновения кризиса при течении кипящей воды в вертикальном кольцевом канале. - Т-р. Амер. о-ва инж.-механиков. Сер. С, 1964, т. 86, № 3, с. 130-136.

28. *Алексеев Г.В., Зенкевич Б.А., Субботин В.И.* Критические тепловые потоки в кольцевых каналах с двухсторонним подводом тепла. - В кн.: Кризис кипения и температурный режим испарительных поверхностей нагрева. - Л.: 1965, с. 123-127.

29. *Миропольский З.Л., Семин Э.Г., Виноградова М.Н.* Статистические закономерности при исследовании кризиса теплообмена. - Теплоэнергетика, 1969, № 7, с. 49-52.

30. *Смолин В.Н., Поляков В.К.* Критический тепловой поток при продольном обтекании пучка стержней. - Теплоэнергетика, 1967, № 4, с. 54-58.

31. *Архипов А.П.* Исследование распределения теплогидравлических параметров потока в пучках цилиндрических тепловыделяющих стержней. - Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. - Киев: 1981 (КПИ). - 26 с.

32. *Кафенгауз Н.Л.* Обзор экспериментальных исследований термоакустических колебаний при теплоотдаче к турбулентному потоку жидкости в трубах // Тр. энергет. ин-та им. Г.М. Кржижановского. - 1974. - Вып. 4.- с.17-21.

33. *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.МЭИ, 1998. - с. 59-63.

34. *Антонюк Н.И., Герлига В.А.* Расчетная методика определения границ термоакустической устойчивости // Двухфазные потоки в тепловом оборудовании атомных электростанций. - Одесса, 1988. - с. 31-32.

35. *Ornatskiy A.P., Sharayevskiy I.G.* Acoustic Phenomena Accompanying Boiling of Water in Annuli under Forced Convection. - Heat Transfer - Soviet Research, 1977, 9, N 3. - p.28-34.

36. *Ornatskiy A.P., Sharayevskiy I.G.* Onset and Development of Thermoacoustic Oscillations in Forced - Convection Boiling of Water. - Heat Transfer - Soviet Research, 1980, 12, N 1. - p.137-144.

37. *Шараевский И.Г.* Об акустических резонансных колебаниях парогенерирующего канала // Пром. теплотехника. - 1980. - т.2. - №6. - с. 24-29.

Получено 23.09.2005 г.