

Методология определения режима начала кипения в тепловыделяющих сборках ТВЭЛОВ путем анализа акустического шума

Обоснована необходимость учета различий физических условий для определения режима начала генерации паровой фазы в различных типах теплогидравлических ячеек тепловыделяющих сборок. Выполнен расчетный анализ условий вскипания теплоносителя на основе известных расчетных зависимостей. Установлены существенные отличия результатов расчета значений теплового потока начала генерации паровой фазы для труб и стержневыхборок. Предложен и реализован эффективный алгоритм нейрокомпьютерного анализа спектров сигналов акустического шума для обнаружения режима начала кипения.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, вскипание теплоносителя, теплогидравлический код, акустический шум, нейрокомпьютерный анализ спектров.

Г. І. Шараєвський

Методологія визначення режиму початку кипіння в тепловидільних збірках твєлів шляхом аналізу акустичного шуму

Обґрунтовано необхідність врахування відмінностей фізичних умов для визначення режиму початку генерації парової фази в різних типах теплогидравлічних комірок тепловидільних зборок. Виконано розрахунковий аналіз умов закипання теплоносія на основі відомих розрахункових залежностей. Встановлено суттєві відмінності результатів розрахунку значень теплового потоку початку генерації парової фази для труб та стержневихборок. Запропоновано й реалізовано ефективний алгоритм нейрокомп'ютерного аналізу спектрів сигналів акустичного шуму для виявлення режиму початку кипіння.

Ключові слова: ядерний реактор, тепловидільна збірка, скипання теплоносія, теплогидравлічний код, акустичний шум, нейрокомп'ютерний аналіз спектрів.

© Г. И. Шараевский, 2016

Согласно данным ряда работ, например [1–3], одной из приоритетных проблемных задач обеспечения безопасности водоохлаждаемых ядерных реакторов (ВОЯР) является верификация комплекса определяющих экспериментальных корреляций, а также эмпирических расчетных зависимостей, используемых в современных теплогидравлических расчетных кодах (ТГРК) в качестве замыкающих соотношений. Наличие указанных соотношений — необходимое условие компьютерной реализации ТГРК, которые служат эффективным инструментальным средством математического моделирования штатных, аварийных и переходных теплогидравлических процессов в оборудовании реакторной установки (РУ) с помощью численного решения принятой исходной системы дифференциальных уравнений сохранения. Очевидно, что приоритет указанной проблемы непосредственно обусловлен актуальным требованием повышения достоверности результатов теплогидравлических расчетов, которые подлежат реализации на основе современных ТГРК улучшенной оценки (RELAP, TRAC, ATHLET, CORSAR и др.). При этом одним из необходимых условий эффективного применения указанных программных средств является наличие адекватных эмпирических расчетных соотношений, используемых для описания ряда определяющих безопасность процессов теплообмена в активных зонах (АкЗ) энергетических ВОЯР. Именно с этих позиций в [1–3] отмечается та приоритетная роль, которую выполняют при оценке теплогидравлической надежности АкЗ эмпирические корреляции для оценки условий начала кипения теплоносителя на теплоотдающей поверхности твэла.

Статья посвящена оценке достоверности расчетных зависимостей, применяемых для определения начала кипения в тепловыделяющих сборках (ТВС) водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов, включая верификацию эмпирической корреляции, используемой для этой цели в ТГРК, а также разработке нейрокомпьютерных программно-технических средств для объективной идентификации этого теплогидравлического режима.

Как известно [1], потенциальная опасность неконтролируемого перехода теплогидравлических режимов в РУ водо-водяного типа от конвекции сначала к пузырьковому кипению на поверхности твэлов, а затем и к кризису теплоотдачи первого рода обуславливает необходимость обнаружения различных стадий кипения в любой точке АкЗ и вынуждает принимать меры к его подавлению несмотря на высокие значения коэффициента теплоотдачи, которыми характеризуется пузырьковое кипение теплоносителя в ТВС. При анализе характера эволюции структуры двухфазного потока в парогенерирующем (ПГ) канале обычно выделяют следующие структурные формы восходящего двухфазного пароводяного потока [1]: пузырьковую, снарядную, эмульсионную, дисперсно-кольцевую. В основу этой классификации положена качественная характеристика топологии границ раздела легкой и тяжелой фаз, основанная на результатах визуализации структурных форм двухфазных потоков, главным образом, по данным анализа кинограмм режимов течения. Отсутствие количественных методов классификации основных структурных форм двухфазного потока не только применительно к условиям ТВС, но и для труб, т. е. каналов простейшей геометрической формы, обусловлено рядом объективных факторов. В их числе не только сложная стохастическая природа формирования и эволюции структуры двухфазного парожидкостного потока в ПГ-канале, но и отсутствие

объективных математических методов автоматической классификации структурных форм кипящего теплоносителя как вероятностных объектов. В стержневых сборках продольно-омываемых твэлов классификация основных типов структурных форм двухфазного потока существенно усложняется, поскольку в каждом сечении пучка реально сосуществуют различные типы парожидкостных структур. В особой мере это относится к обнаружению начала кипения — нижней границы пузырьковой формы течения двухфазного потока.

Трудности определения границ основных структурных форм двухфазного потока в ПГ-каналах любой геометрии, особенно в ТВС, на основе эмпирических зависимостей и сформированных на их основе карт режимов течения носят объективный характер. Подчеркнем, что в реальных условиях АкЗ ядерных реакторов существующие экспериментальные методы определения форм течения двухфазных потоков (анализ адекватности этих методов выполнен, например, в [1, 4–6]) не могут быть использованы. Подобные проблемы вызваны не только естественной размытостью границ между структурными формами двухфазного потока, но и их физической нечеткостью как случайных объектов. Так, на основе анализа, приведенного в [1], установлено, что в настоящее время известны девять основных типов эмпирических формул для расчета нижней границы пузырьковой структуры двухфазного потока в ПГ-канале. В соответствии с этими подходами к физической трактовке плотности теплового потока начала кипения ($q_{н.к.}$) при создании каждой из зависимостей были качественно описаны и на этой основе постулированы соответствующие условия перехода теплоотдающей поверхности от конвективной теплоотдачи к устойчивой генерации легкой фазы паровыми пузырями на поверхности твэлов. Таким образом, условия перехода ПГ-канала от однофазного режима течения к пузырьковой структуре двухфазного потока достаточно произвольны и потому в известной мере субъективно установлены соответствующим автором каждой из известных эмпирических расчетных зависимостей по началу кипения. При этом, в связи с неоднозначностью физической трактовки $q_{н.к.}$ как исходного состояния кипящего канала при формировании в нем различных типов парожидкостных структур, началу кипения во всех известных работах достаточно условно ставятся в соответствие различные участки температурной кривой, т. е. графика функции $T_{ст} = \varphi(q)$ в окрестности точки $q_{н.к.}$, хотя вероятностный характер теплогидравлического параметра $q_{н.к.}$ очевиден. Расхождения в указанных подходах к детерминированному определению на основе эмпирических формул для расчета $q_{н.к.}$ такого стохастического процесса, каким является начало генерации паровой фазы, в значительной мере объясняются отсутствием у экспериментаторов эффективных средств обнаружения момента активации первых центров парообразования. Надежное обнаружение этого теплогидравлического режима актуально как для ядерной энергетики, так и для других высокотехнологичных приложений.

С учетом рассмотренного состояния исследований в области теплогидравлики ВОЯР необходимо, в частности, конкретизировать приоритетные направления теплофизических исследований. Проблематику верификации режима начала кипения в ТВС следует считать одной из важнейших в общем контексте работ в области совершенствования современных ТГРК, которые стали в последние годы основным и практически безальтернативным

инструментальным средством обоснования эксплуатационной безопасности ВОЯР. На основании данных анализа чувствительности и разрешающей способности различных методов обнаружения начала кипения в экспериментальных ПГ-каналах (термометрия, оптическая голография, гамма-сканирование пароводяного потока, его нейтронная диагностика и др.) можно считать установленным, что диагностические сигналы акустической эмиссии процесса кипения, регистрируемые на выходе высокотемпературных сенсоров сигналов динамического давления, генерируемые в процессе активации центров парообразования на поверхности твэлов, характеризуются наибольшей чувствительностью и наиболее пригодны для обнаружения $q_{н.к.}$ в ТВС. В этой связи необходима разработка методологического подхода к верификации режима начала кипения в тепловой модели ТВС с теплогидравлически неравноценными ячейками на основе специальных интеллектуальных алгоритмов автоматической компьютерной классификации больших статистических массивов акустических диагностических сигналов в ПГ-канале. Заметим, что отсутствие надежных расчетных соотношений для основных типов теплогидравлических ячеек в ТВС вынуждает использовать при расчете режима начала кипения в АкЗ ВОЯР соответствующие расчетные зависимости для труб с недостаточным глубоким физическим обоснованием реальной возможности их применения. Отличительной теплофизической особенностью стержневых сборок твэлов является существенно неравномерное распределение энтальпии потока по их поперечному сечению. Помимо этого, данные ряда специальных исследований [1, 6, 7] свидетельствуют о том, что при разработке и совершенствовании современных ТГРК должна быть предусмотрена возможность учета независимого асинхронного вскипания теплоносителя в основных типах теплогидравлических ячеек ТВС ВОЯР. Установлено, что энтальпия потока достигает своего наибольшего значения в центральной теплогидравлической ячейке, в силу чего аномальный (начало кипения) и аварийный (кризис теплоотдачи) теплогидравлические процессы происходят именно в этой части сборки, что не может быть учтено соответствующими расчетными зависимостями, которые оперируют среднепучковым значением этого параметра. По этой же причине использование зависимости Дж. Чена [1] для определения теплового потока начала кипения в трубах также приводит к существенному завышению получаемой расчетной величины этого параметра. В этой связи следует ожидать, что с учетом реальной теплонапряженности центральной ячейки ТВС процесс генерации паровой фазы в ней должен возникнуть существенно раньше.

Особенности начала кипения и определения локальных значений параметров потока в ячейках модельной ТВС экспериментально исследованы в [8]. Рабочий участок представлял собой пучок из семи стержней диаметром 6 мм, длиной 1,3 м, помещенный внутри шестигранного вытеснителя размером «под ключ» 24 мм. Равномерный по длине и сечению обогрев пучка осуществлялся на участке 1 м. В соответствии с методикой [6, 9], повсеместно используемой при анализе теплогидравлики стержневых сборок твэлов, поперечное сечение канала было условно разделено на три типа характерных теплогидравлических ячеек, топологические особенности и расположение которых изображены на рис. 1.

Методика проведения экспериментов по исследованию распределения параметров теплоносителя по сечению

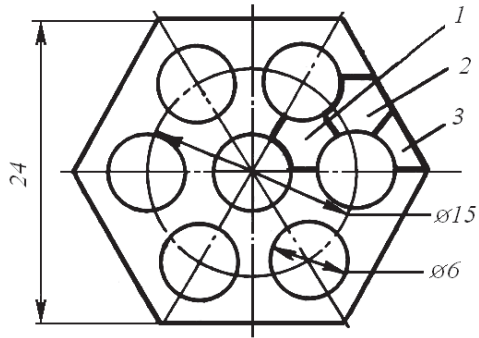


Рис. 1. Топология характерных теплогидравлических ячеек в поперечном сечении экспериментального рабочего участка с семью тепловыми имитаторами твэлов: 1 — центральная ячейка; 2 — боковая, 3 — угловая

пучка рассмотрена в [1]. Локальные значения массовой скорости ρw и относительной энтальпии x потока во всех характерных ячейках определялись как до начала кипения при течении однофазного потока, так и после начала кипения при поверхностном кипении недогретой жидкости и течении двухфазного потока. По результатам выполненных экспериментов установлено, что начало генерации паровой фазы в описанной модельной ТВС вызвало существенное перераспределение определяющих теплогидравлических параметров (ρw и x) — по сечению стержневой сборки твэлов. Типичный характер такого перераспределения параметров представлен на рис. 2.

Из анализа приведенных на рис. 2 экспериментальных данных следует, что имеет место раздельное, т. е. фактически асинхронное вскипание теплоносителя в основных типах теплогидравлических ячеек модельной ТВС. Подобная асинхронность физически проявляется как первоначальная генерация паровой фазы в наиболее энергонапряженной — центральной — теплогидравлической ячейке стержневой сборки тепловых имитаторов твэлов при сохранении режима конвективной теплоотдачи в боковой и угловой ячейках. Именно об этом свидетельствует факт снижения

массовой скорости в центральной ячейке в результате увеличения ее гидравлического сопротивления из-за загромождения проходного сечения этого субканала модельной ТВС первыми генерируемыми в нем на теплоотдающей поверхности паровыми пузырями. Непосредственным следствием особенностей асинхронной теплогидравлики процесса вскипания теплоносителя в характерных субканалах исследуемой сборки твэлов являются рост относительной энтальпии пароводяного потока в центральной ячейке ТВС и соответственное уменьшение указанного параметра в ее угловой зоне. Дополнительная фиксация факта начала кипения в ТВС обеспечивалась посредством пассивного акустического зондирования пароводяного потока в экспериментальном участке (методические особенности акустических диагностических измерений описаны в [1, 5]) и, кроме того, дополнительно контролировалась на основании данных оперативного контроля температурных режимов обогреваемых поверхностей твэлов в верхнем выходном сечении модельной стержневой сборки.

Переходя к рассмотрению основных результатов выполненных исследований, а также анализу вычислительных и алгоритмических особенностей предлагаемого в настоящей работе методологического подхода к верификации режима начала кипения в ТВС, необходимо отметить следующее. Теплофизические эксперименты по обнаружению вскипания теплоносителя в модельной ТВС выполнены в диапазоне интегральных значений массовой скорости в пучке 300...2500 кг/(м²·с) при давлениях 6...14 МПа и плотностях теплового потока 0,3...2 МВт/м², которые соответствуют факту вскипания теплоносителя. Во всех экспериментах синхронно с измерением определяющих теплофизических параметров, а именно: плотности теплового потока, локальных значений массовой скорости и энтальпии (типичный характер изменения этих параметров в режиме начала кипения представлен на рис. 2), — выполнены и диагностические измерения. Последние включали цифровой спектральный анализ и компьютерную регистрацию с последующей обработкой статистических массивов реализаций автоспектральной плотности (АСП) диагностических сигналов акустического шума двухфазного потока теплоносителя, движущегося в экспериментальной ТВС.

Задача идентификации режимов пузырькового кипения в ТВС, включая кризис теплоотдачи, формулируется

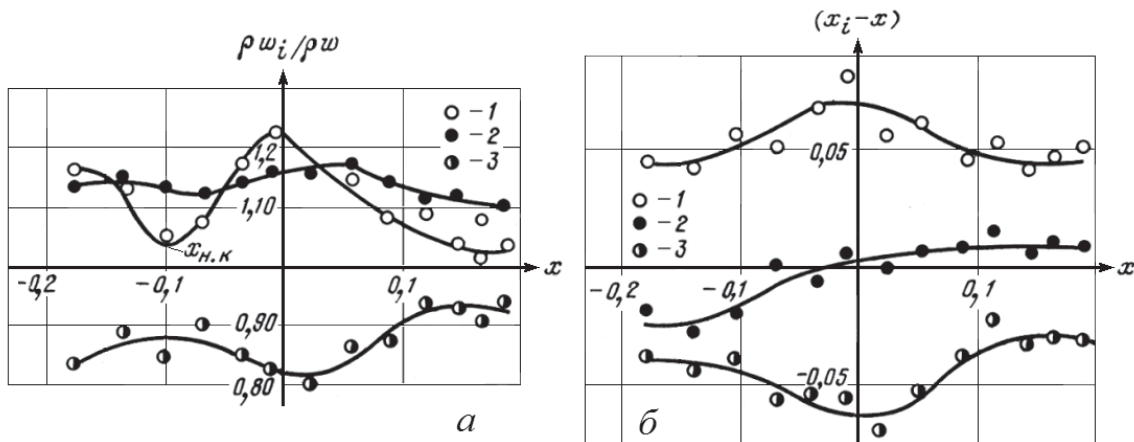


Рис. 2. Характер изменения относительной массовой скорости (а) и относительной энтальпии (б) теплоносителя в теплогидравлических ячейках модельной ТВС при интегральной массовой скорости 300 кг/(м²·с), давлении 14 МПа, плотности теплового потока 0,3 МВт/м²; 1...3 — типы теплогидравлических ячеек

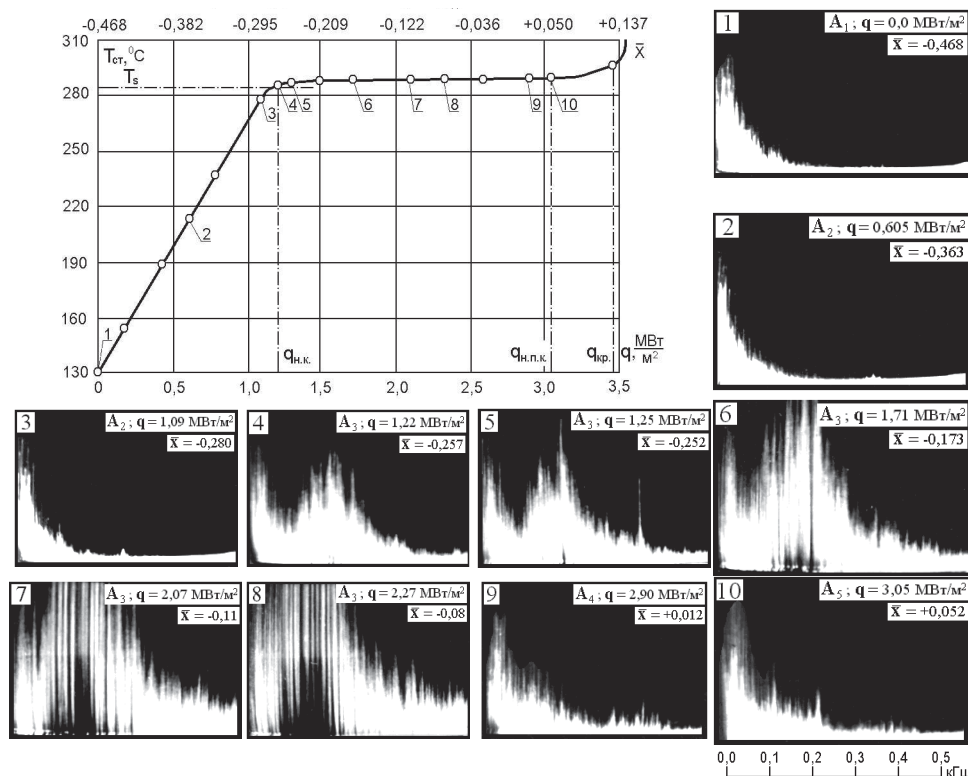


Рис. 3. Результаты синхронной регистрации температуры стенки в выходном сечении экспериментального участка и АСП акустического шума для пяти распознаваемых теплогидравлических режимов при $p=6,86$ МПа, $\rho_w=2000$ кг/(м²·с), входном недогреве $\Delta T_{нед}^{вх}=154$ °С

как распознавание этих режимов на основе случайных параметров АСП акустического шума, измеренного в описанной выше экспериментальной ТВС (в [1] представлены результаты измерений сигналов динамического давления в ее верхнем выходном сечении).

В качестве примера информационной значимости спектральных параметров АСП акустического шума в исследованном диапазоне параметров процесса теплоотдачи на рис. 3 приведены результаты синхронной регистрации температурного режима продольно-омываемой стержневой сборки электрообогреваемых имитаторов твэлов.

Задача распознавания случайных объектов АСП акустического шума для основных теплогидравлических режимов формулируется следующим образом:

а) распознаваемые теплогидравлические режимы $A = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$, представленные множеством диагностических признаков $X_j, j=1, 2, \dots, N$ в бинарной форме, занимают в пространстве этой размерности соответствующие области;

б) распознаванию подлежит номер области $i \in M$, который соответствует принадлежности входного неизвестного вектора к одной из областей N -мерного пространства диагностических признаков.

Известно [10], что методология искусственных нейронных сетей (ИНС) как область нейроинформатики в теории искусственного интеллекта [11] может служить принципиальной основой для разработки эффективных интеллектуальных алгоритмов распознавания случайных объектов посредством 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, состоящая из двух слоев (рис. 4). Первый и второй слои имеют

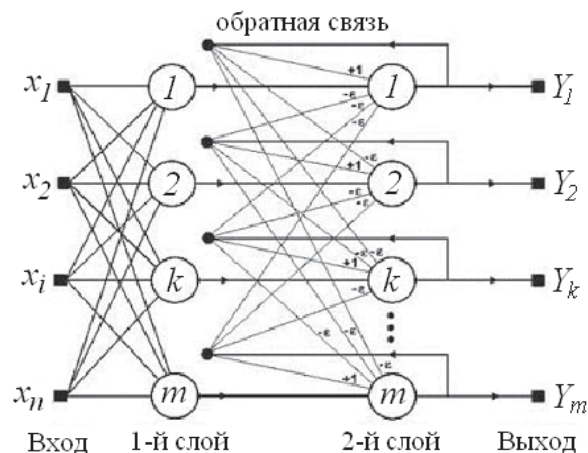


Рис. 4. Структурная схема сети Хэмминга

по m нейронам, M — мощность множества классов, которой соответствует число нейронов в слое. При этом 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.

Алгоритм функционирования ИНС с указанной топологией состоит в нахождении расстояния Хэмминга от тестируемого образа до всех образов множества спектральных компонент x_1, x_2, \dots, x_n . Представление диагностических векторов в бинарной системе позволяет эффективно вычислять расстояние между ними на основе так называемой метрики Хэмминга, которая представляет собой число бит, на которые отличаются два сравниваемых между собой вектора. При этом 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 -й элемент k -го образца.

Весовые коэффициенты тормозящих синапсов во втором слое целесообразно принимать равными величине $0 < \varepsilon < 1/M$. Синапс нейрона, связанный с его же аксоном, имеет вес $+1$.

В рассматриваемом случае алгоритм функционирования сети Хэмминга должен включать следующие шаги:

1. На входы сети поступает неизвестный вектор $\mathbf{X} = \{x_i, i = 0, \dots, n-1\}$, 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. Вычисляются новые состояния нейронов второго слоя

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

и значения их аксонов:

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

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

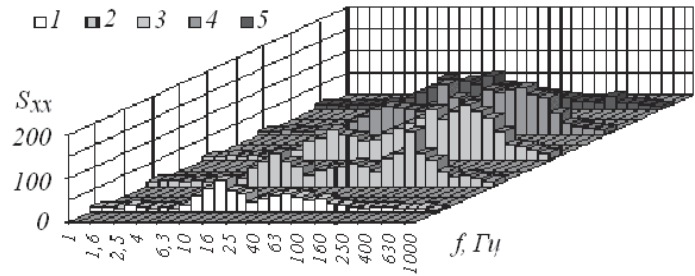


Рис. 5. Характер изменения частотной структуры АСП акустических диагностических сигналов в верхней камере экспериментальной ТВС для основных структурных форм двухфазного парожидкостного потока:

- 1 — однофазный поток; 2 — начало кипения;
- 3 — пузырьковый режим; 4 — снарядный (эмульсионный режим);
- 5 — дисперсно-кольцевая структура

3. Проверяется наличие факта изменения состояния выходов нейронов второго слоя за последнюю итерацию. При наличии этого факта расчет повторяется с новыми значениями вплоть до отсутствия рассогласования, при достижении которого происходит останов расчета.

На основе предложенной модели ИНС Хэмминга в данной работе выполнено распознавание указанного экспериментального массива АСП акустического шума с использованием 28 спектральных признаков, каждый из которых имел 70 градаций спектральной интенсивности для пятиэлементного множества A_1, \dots, A_5 . Получена надежность правильной идентификации каждого из этих теплогидравлических режимов в ТВС, близкая к 100 %.

Особенности характера изменения частотной структуры АСП сигналов акустического шума в основных структурных формах (A_1, \dots, A_5) двухфазного потока по мере увеличения тепловой мощности экспериментальной ТВС с тепловыми имитаторами твэлов проиллюстрированы на рис. 5, при построении которого использованы данные собственных исследований парожидкостных потоков с использованием электрорезистивных датчиков [1], а также приведенные в этой работе данные голографических исследований этих потоков, полученные Л. Л. Левитаном и Л. Я. Боровским.

Как следует из представленных на рис. 6 экспериментальных данных, все характерные фазы перехода теплоотдающей поверхности от конвективной теплоотдачи к режиму пузырькового кипения однозначно характеризуются параметрами АСП гидроакустического сигнала в кипящей жидкости. Высокая значимость спектральных признаков гидроакустических сигналов в потоке кипящего теплоносителя сохраняется и в условиях гидродинамической кавитации на элементах циркуляционного контура [5], а также при значениях режимных параметров процесса, в первую очередь давления, характерных для условий эксплуатации твэлов в реакторах некипящего и кипящего типов. Характерно, что с ростом давления теплоносителя спектральный диапазон гидроакустического сигнала смещается в более низкочастотную область. Показательны также представленные на этой иллюстрации АСП акустического шума в режиме начала кипения не только в электрообогреваемых имитаторах твэлов, но и в натурном технологическом канале реактора РБМК-1000 энергоблока № 1 Чернобыльской АЭС.

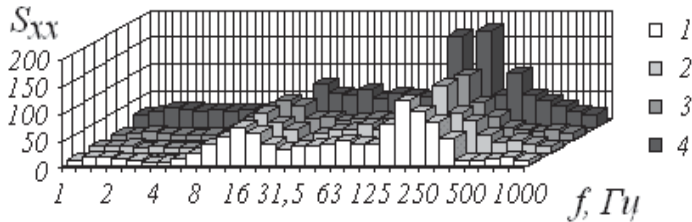


Рис. 6. Сопоставление частотной структуры АСП акустического шума в режиме начала кипения воды (параметры процесса: $p=6,86$ МПа, $\rho_w=2450$ кг/(м²·с); $\Delta T_{\text{вых}}=14$ К) в каналах различной геометрии:

1 — электрообогреваемый цилиндрический канал ($D_{\text{вн}}=8,8 \cdot 10^{-3}$ м, обогреваемая длина $l_{\text{об}}=2,5$ м); 2 — семистержевая сборка электрообогреваемых имитаторов твэлов ($D_{\text{нар}}=6 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{\text{об}}=1,0$ м, гидравлический диаметр пучка $5,60 \cdot 10^{-3}$ м, тепловой диаметр пучка $9,13 \cdot 10^{-3}$ м); 3 — трехстержевая сборка электрообогреваемых имитаторов твэлов ($D_{\text{нар}}=6 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{\text{об}}=0,6$ м, гидравлический диаметр $2,39 \cdot 10^{-3}$ м, тепловой диаметр $4,61 \cdot 10^{-3}$ м); 4 — натуральный технологический канал реактора РБМК-1000 Чернобыльской АЭС

Наряду с изложенным нейросетевым диагностическим подходом к идентификации режима начала кипения в полномасштабных и модельных ТВС, перспективной идентификационной технологией для верификации режима начала кипения следует считать реализацию компьютерного кластер-анализа соответствующих экспериментальных данных. Математически проблема автоматической классификации (кластер-анализа) начала кипения в ТВС формулируется следующим образом. Случайные реализации АСП рассматриваются как N -мерные случайные векторы \mathbf{X} , формируемые значениями спектральной плотности каждого из N -спектральных признаков. При этом признак $x^{(q)}$ вектора \mathbf{X} , рассматриваемый как компонент представленного в N -мерном признаковом пространстве вектора $\mathbf{X}=\{x^{(1)}; x^{(2)}; \dots; x^{(q)}; \dots; x^{(N)}\}$, принимает значения из интервала $L \leq x^{(q)} \leq C$. Задача кластеризации множества случайных реализаций АСП для каждого из спектральных признаков с R -градациями спектральной плотности $x^{(q)}=\{x_1^{(q)}, \dots, x_R^{(q)}\}$, разделяемой на отдельные подмножества $x_1^{(q)}, \dots, x_R^{(q)}$, сформулирована так, чтобы выполнялись условия:

1. Подмножества $x_1^{(q)}, \dots, x_R^{(q)}$ не пересекаются, т. е. $x_i^{(q)} \cap x_j^{(q)} = 0$ ($i \neq j$).

2. Любой элемент из множества $x^{(q)}$ попадает только в одно из его подмножеств, т. е. $\bigcup x_i^{(q)} = x^{(q)}$.

3. Каждый элемент подмножества x_i^R состоит из наиболее «близких» элементов.

Компьютерная реализация алгоритма кластер-анализа [1] выполнялась на исходном экспериментальном массиве АСП сигналов акустического шума для двух идентифицируемых теплогидравлических режимов: конвективной теплоотдачи на поверхности твэлов и собственно начала кипения. Результаты реализации составили необходимые для верификации нижней границы пузырьковой структуры двухфазного потока в ТВС данные, позволяющие оценить адекватность применения в современных ТГРК известных эмпирических расчетных зависимостей для ПГ-каналов цилиндрической геометрии для расчета условий начала кипения в стержневых сборках.

В рассматриваемых экспериментах вскипание теплоносителя идентифицировалось по факту изменения

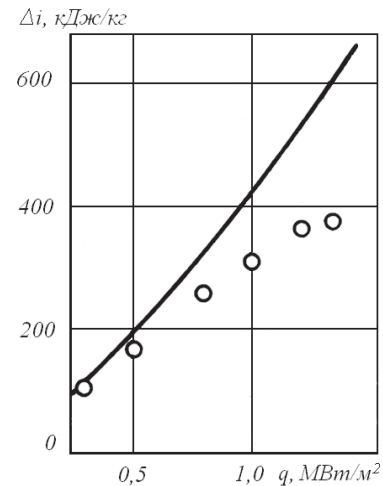


Рис. 7. Сопоставление опытных данных по недогреву воды в пучке, соответствующему началу кипения (O), с результатами расчетов по формуле из [13] (расчетная кривая)

характера распределения относительной массовой скорости и относительной энтальпии в пучковых ячейках (см. рис. 2), а также на основе анализа изменения структуры распределений вероятностей $P(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i)$, обуслов-

ленного трансформацией частотной структуры АСП акустического шума (см. рис. 3), при переходе от конвекции к кипению. Полученное по результатам кластер-анализа двухэлементное множество АСП классов конвективного режима теплоотдачи и режима начала кипения составило основу для реализации обучения распознающей системы и последующего распознавания этих классов с помощью решающего правила. Особенности формирования признакового пространства и реализации алгоритма байесовского типа рассмотрены в [1]. Достигнута надежность правильной идентификации каждого из указанных теплогидравлических режимов ТВС, превышающая 90 %.

Сопоставление опытных данных для кипения с результатами расчетов по зависимости для пучков стержней [12] показало неудовлетворительное их согласование (на рис. 7 приведены результаты для типичного режима: $\rho_w = 750$ кг/(м²·с); $p = 6$ МПа), что может быть объяснено теплогидравлической неравноценностью ячеек в исследованных ТВС в [8] и [12]. Этим обуславливается необходимость перехода от среднепучковых параметров к параметрам потока в «горячей», т. е. самой теплонапряженной и поэтому опасной с точки зрения возможности достижения КТП, ячейке.

Несмотря на то что в последних модификациях кода RELAP имеется опция учета геометрических особенностей пучка стержней, расчетным по теплообмену параметром продолжает оставаться среднепучковая энтальпия потока, чем обосновывается продолжающаяся практика использования в ряде ТГРК зависимости Дж. Чена для труб. Иллюстрацией результатов такого подхода может служить представленное ниже сопоставление условий начала кипения жидкости в трубе и в центральной ячейке стержневой сборки.

Сравнительная оценка опытных данных для типичного режима ($\rho_w=750$ кг/(м²·с); $p=6$ МПа) на основании

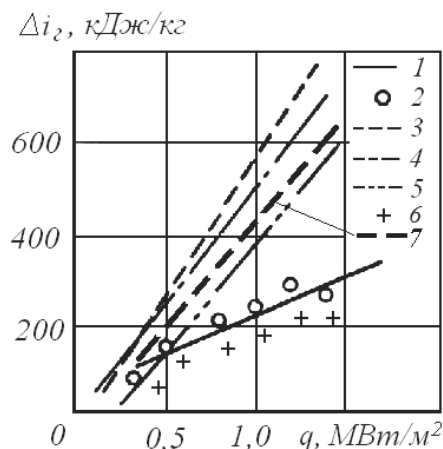


Рис. 8. Сопоставление опытных данных по началу кипения с результатами расчетов:

1 — [16]; 2 — эксперимент; 3 — [12]; 4 — [14]; 5 — [13];
6 — результаты реализации нейросетевого алгоритма распознавания режима активации первых центров парообразования применительно к данным эксперимента; 7 — результаты расчетов по формуле Дж. Чена [1] в теплогидравлических условиях $\rho_w = 750 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$, $p = 6 \text{ МПа}$

сопоставления с результатами расчетов по имеющим наибольшее распространение формулам для труб [13–16] показана на рис. 8 в координатах $\Delta i_T = f(q)$, где Δi_T — недогрев жидкости до состояния насыщения в самой «горячей» центральной ячейке, а q — плотность теплового потока, соответствующая началу кипения в канале. Отметим, что методы фиксации начала кипения в перечисленных выше работах были различными. В частности, в [13] в качестве определяющего условия возникновения кипения принята стабилизация температурного режима обогреваемой поверхности. В [15] начало кипения фиксировалось визуально. В [16] методом γ -просвечивания определялся момент начала интенсивного парообразования по началу резкого увеличения истинного паросодержания. Начало кипения в [14] определялось по условию достижения минимального уровня температуры стенки, достаточного для зарождения паровых пузырей.

Как видно из рис. 8, экспериментальные данные по началу кипения в «горячей» центральной ячейке удовлетворительно обобщаются формулой из [16], рекомендованной для течения в трубах при $p = 2,94 \dots 14,7 \text{ МПа}$, $q = 0,4 \dots 4,5 \text{ МВт/м}^2$, $\rho_w = 400 \dots 3500 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$. Из рисунка также видно, что результаты расчетов по формуле Дж. Чена [1] достаточно хорошо коррелируют с расчетными зависимостями для определения условий начала кипения в трубах, однако несколько завышают реальные значения недогрева потока в условиях начала генерации паровой фазы в ТВС применительно к исследованному режиму аварийного пониженного давления.

Физически адекватное описание условий работы первых центров парообразования формулой для начала интенсивного парообразования при использовании акустических измерений можно объяснить следующим образом. Течение жидкости в элементарной ячейке отличается от течения в трубе значительной турбулизацией потока, вызванной наличием в пучке стержней дистанционирующих решеток, — профиль температуры в ячейке пучка стержней ближе к профилю на участке стабилизации. Это означает, что при идентичных температурах стенки средняя

температура потока в ячейке выше, а недогрев меньше, чем в стабилизированном потоке и трубе. К аналогичному выводу пришли авторы работы [13], сопоставляя условия начала кипения в трубе и пучке стержней.

Полученные в настоящей работе результаты хорошо коррелируются с данными недавней обзорной работы [18], в которой представлен ряд экспериментальных подтверждений существования рассмотренного «эффекта пучка». Последний проявляет себя в значительных различиях характера и динамики теплотехнических процессов в основных типах теплогидравлических ячеек ТВС. Следует подчеркнуть, что при анализе результатов расчетов с использованием современных ТГРК целесообразно учитывать указанный эффект. Необходимо также отметить, что физически обоснованное в работах [1, 8] использование формулы [16] реализовано в отечественных ТГРК «Пучок 2 Д» и «Пучок 2 С», в которых применена неомогенная модель турбулентного обмена между ячейками в двухфазном потоке, учитывающая также поперечные перетоки теплоты.

Выводы

1. Применение формулы В. Г. Брантова из работы [16] для оценки условий вскипания теплоносителя в ТВС представляется достаточно физически обоснованным ввиду того, что она фактически соответствует условиям существования режима развитого пузырькового кипения в центральных, т. е. наиболее энергонапряженных теплогидравлических ячейках стержневой сборки твэлов.

2. Предпринятая в настоящей работе попытка использования новых информационных технологий (предложенного алгоритма нейросетевого анализа спектров шумовых диагностических сигналов) позволила обнаружить режим активации первых центров парообразования в центральной ячейке ТВС при тепловых потоках, существенно меньших (примерно на 20 %), чем расчетные значения теплового потока вскипания по формуле В. Г. Брантова.

3. Предложенная методика обнаружения начальных фаз теплогидравлических аномалий может быть эффективно использована при создании нового поколения программно-технических средств оперативной шумовой диагностики ВОЯР.

Список использованной литературы

1. *Теплофизика безопасности атомных электростанций* : Монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский. — Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. — 484 с.
2. Мигров Ю. А. Теплогидравлические расчетные коды нового поколения. Общая характеристика и перспективы развития / Ю. А. Мигров, С. Л. Соловьев // *Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация)*: Сб. тез. докл. конф. «Теплофизика-2001». — Обнинск, 2001. — С. 13–16.
3. Нигматулин Б. И. Состояние и развитие отечественных системных теплогидравлических кодов для моделирования аварийных и нестационарных процессов на АЭС с ВВЭР / Б. И. Нигматулин, О. И. Мелихов, С. Л. Соловьев // *Теплоэнергетика*. — 2001. — № 3. — С. 17–20.
4. *Теплофизика аварий ядерных реакторов* : Монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Е. И. Шараевская. — Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2012. — 528 с.

5. *Теплофизика поврежденных реакторных установок* : Монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Н. И. Шараевская. — Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2013. — 528 с.

6. *Теплофизика надежности активных зон* : Монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский. — Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2015. — 772 с.

7. *Миронов Ю. В., Шпанский С. В.* Распределение параметров двухфазного потока по сечению канала с пучками ТВЭЛов / Ю. В. Миронов, С. В. Шпанский // *Атомная энергия*. — 1975. — Вып. 6, Т. 39. — С. 403—408.

8. *Метод верификации начала вскипания теплоносителя в каналах ядерного реактора* / И. Г. Шараевский, Е. Д. Домашев, А. П. Архипов, Е. И. Шараевская // *Пром. теплотехника*. — 2001. — Т. 23, № 4—5. — С. 114—121.

9. *Проблемы расчетного определения кризиса теплоотдачи в тепловыделяющих сборках реакторов ВВЭР на основе современных версий теплогидравлических кодов* / Н. М. Фиалко, Г. И. Шараевский, С. В. Бабак, Е. И. Шараевская // *Проблемы безопасности АЭС и Чернобыля*. — 2014. — Вып. 22. — С. 34—43.

10. *Cichocki A.* Neural networks for optimization and signal progressing / Cichocki A., Unbehauen R. — N.Y. : Wiley, 1993. — 287 p.

11. *Люгер Д.Ф.* Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем : Пер. с англ. — 4-е изд. — М. : Изд. дом «Вильямс», 2003. — 864 с.

12. *Экспериментальное исследование теплообмена и гидравлического сопротивления на моделях тепловыделяющихборок реактора ВВЭР* / Ю. Д. Барулин, А. С. Коньков, А. И. Леонтьев, И. В. Тарасова // *Проблемы создания и эксплуатации электростанций*: Тр. ВТИ. — 1977. — Т. 11. — С. 214—220.

13. *Тарасова Н. В.* Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при поверхностном кипении воды в кольцевых каналах / Н. В. Тарасова, В. М. Орлов // *Конвективная теплопередача в двухфазном и однофазном потоке*. — М., Л. : Энергия, 1964. — С. 162—187.

14. *Чернобай В. А.* О начале пузырькового кипения при вынужденном движении жидкости / В. А. Чернобай. — Препр. ТЭФ КПИ. — К., 1971. — 8 с.

15. *Трещев Г. Г.* Число центров парообразования при поверхностном кипении / Г. Г. Трещев // *Конвективная теплопередача в двухфазном и однофазном потоке*. — М., Л. : Энергия, 1964. — С. 162—187.

16. *Брантов В. Г.* Истинное объемное паросодержание и кризис теплообмена в трубах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М. : МЭИ, 1975. — 23 с.

17. RELAP5/MOD3.2 Idaho National Engineering Laboratory / Lockheed Idaho Technologies Company. — Idaho Falls, June 1995. — 430 p.

18. *Бобков В.П.* Критический тепловой поток при кипении воды в каналах. Современное состояние, характерные закономерности, нерешенные проблемы и пути их решения (обзор) / В. П. Бобков // *Теплоэнергетика*. — 2015. — № 2. — С. 10—18.

References

1. *Kliuchnikov, A.A., Sharaievskiy, I.G, Fialko, N.M., Zimin, L.B., Sharaievskiy, G.I.* (2010), “Thermal Physics of Nuclear Power Plant Safety: Monography” [Теплофизика безопасности атомных электростанций: Монография], Chornobyl, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 484 p. (Rus)

2. *Migrov, Yu.A., Soloviev, S.L.* (2001), “Thermohydraulic Computer Codes of New Generation. General Characteristics and Development Prospects” [Теплогидравлические расчетные коды нового поколения. Обобщающая характеристика и перспективы развития], Thermohydraulic Codes for Energy Reactors (Development and Verification), Collection of Proceedings of Conference “Thermal Physics-2001”, Obninsk, pp. 13—16. (Rus)

3. *Nigmatulin, B.I., Melikhov, O.I., Soloviev, S.L.* (2001), “State and Development of National Systemic Thermohydraulic Codes for Modeling Emergency and Non-Stationary Processes at NPP with VVER”

[Sostoianii i razvitiie otechestvennykh sistemnykh teplogidravlicheskiikh kodov dlia modelirovaniia avariinykh i nestatsionarnykh protsessov na AES c VVER], Thermal Energy, No. 3, pp. 17—20. (Rus)

4. *Kliuchnikov, A.A., Sharaievskiy, I.G, Fialko, N.M., Zimin, L.B., Sharaievskaya, Ye.I.* (2012), “Thermal Physics of Nuclear Reactor Accidents: Monography” [Теплофизика аварии ядерных реакторов: Монография], Chornobyl, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 528 p. (Rus)

5. *Kliuchnikov, A.A., Sharaievskiy, I.G, Fialko, N.M., Zimin, L.B., Sharaievskaya, N.I.* (2013), “Thermal Physics of Reactor Damage: Monography” [Теплофизика повреждения реакторных установок: Монография], Chornobyl, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 528 p. (Rus)

6. *Kliuchnikov, A.A., Sharaievskiy, I.G, Fialko, N.M., Zimin, L.B., Sharaievskiy, G.I.* (2015), “Thermal Physics of Core Reliability: Monography” [Теплофизика надежности активных зон: Монография], Chornobyl, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 772 p. (Rus)

7. *Mironov, Yu.V., Shpanskii, S.V.* (1975), “Distribution of Parameters of Two-Phase Flow Through Cut Set of Channel with Fuel Rod Bundles” [Распределение параметров двухфазного потока по сечению канала с пучками ТВЭЛов], No. 6, V. 39, pp. 403—408. (Rus)

8. *Sharaievskiy, I.G., Domashev, Ye.D., Arkhipov, A.P., Sharaievskaya, Ye.I.* (2001), “Methodology for Verification of Coolant Boiling Initiation in Reactor Channels” [Метод верификации начала вскипания теплоносителя в каналах ядерного реактора], Industrial Thermal Engineering, V. 23, No. 4—5, pp. 114—121. (Rus)

9. *Fialko, N.M., Sharaievskiy, G.I., Babak, S.V., Sharaievskaya, E.I.* (2014), “Problems in Computer Definition of Departure from Nucleate Boiling in Fuel Assemblies of VVER Based on Current Versions of Thermohydraulic Codes” [Проблемы расчетного определения кризиса теплоотдачи в тепловыделяющихбороках реакторов ВВЭР на основе современных версий теплогидравлических кодов], Safety Problems of NPPs and Chornobyl, No. 22, pp. 34—43. (Rus)

10. *Cichocki, A., Unbehauen, R.* (1993), “Neural Networks for Optimization and Signal Progressing”, N.Y., Wiley, 287 p.

11. *Liuger, D.F.* (2003), “Artificial Intelligence: Strategies and Methods of Solving Complex Problems” [Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем], Translated from English, Moscow, Williams Publishing House, 864 p. (Rus)

12. *Barulin, Yu.D., Konkov, A.S., Leontiev, A.I., Tarasova, I.V.* (1977), “Experimental Study of Heat Exchange and Hydraulic Resistance in Models of VVER Fuel Assemblies” [Экспериментальное исследование теплообмена и гидравлического сопротивления на моделях тепловыделяющихборок реактора ВВЭР], Problems in Construction and Operation of Power Plants, V. 11, pp. 214—220. (Rus)

13. *Tarasova, N.V., Orlov, V.M.* (1964), “Heat Transfer and Hydraulic Resistance in Surface Boiling of Water in Annular Channels” [Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при поверхностном кипении воды в кольцевых каналах], Convective Heat Transfer in Two-Phase and One-Phase Flow, Moscow, Leningrad, Energy, pp. 162—187. (Rus)

14. *Chernobai, V.A.* (1971), “About Bubble Boiling Initiation in Forced Fluid Flow” [О начале пузырькового кипения при вынужденном движении жидкости], Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 8 p. (Rus)

15. *Treshchiov, G.G.* (1964), “Number of Vaporization Centers in Surface Boiling” [Число центров парообразования при поверхностном кипении], Convective Heat Transfer in Two-Phase and One-Phase Flow, Moscow, Leningrad, Energy, pp. 149—161. (Rus)

16. *Brantov, V. G.* (1975), “True Vapor Fraction and Departure from Nucleate Boiling in Piping” [Истинное объемное паросодержание и кризис теплообмена в трубах], Abstract of a Thesis, Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 23 p. (Rus)

17. RELAP5/MOD3.2 Idaho National Engineering Laboratory, Lockheed Idaho Technologies Company, Idaho Falls, June 1995, 430 p.

18. *Bobkov, V.P.* (2015), “Critical Heat Flux in Water Boiling in Channels. Current State, Typical Factors, Unsolved Problems and Their Solution” [Критический тепловой поток при кипении воды в каналах. Современное состояние, характерные закономерности, нерешенные проблемы и пути их решения (обзор)], Thermal Energy, No. 2, pp. 10—18. (Rus)

Получено 24.02.2016.