

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ВКЛЮЧАЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ (05.14.03)

УДК 621.039.548

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-39-49

Прогнозирование виброакустических резонансов в активных зонах атомных электрических станций с водо-водяным энергетическим реактором

К.Н. Проскуряков, А.В. Аникеев, И. Афшар, С.К. Белова, Д.А. Писарева

Установлено, что для увеличения кампании топлива и совершенствования топливного цикла необходимо уменьшать фреттинг-износ ТВС и ТВЭЛ, т. е. снижать воздействие на них циклических нагрузок и вибраций. Выявлено, что основными источниками их возбуждения являются нестационарные гидродинамические процессы в теплоносителе и несбалансированность циркуляционных насосов. Показано, что для обоснования возможности увеличения кампании топлива следует выявить условия, при которых уровень вибраций превышает допустимые значения, провести идентификацию причин превышения и предотвратить или ограничить их воздействие. Для решения указанных задач используют данные систем технической диагностики, состоящих из разнообразных измерительных каналов.

Отмечена важность разработок CFD-кодов для исследования теплогидравлической модели реактора и, в частности, для построения картограмм распределения температуры по сечению на выходе активной зоны.

Констатировано признание вывода о том, что исследование вибрационных характеристик тепловыделяющих сборок (ТВС) в работающем реакторе невозможно, а на экспериментальных установках не удастся воспроизвести ряд важнейших процессов, определяющих комплекс гидродинамических нагрузок. Указывается на признание того, что имеется ряд недостаточно исследованных явлений и процессов в элементах оборудования АЭС, которые влияют на вибрационное состояние ТВС и ТВЭЛ, но в существующих системных кодах либо рассматриваются крайне упрощенно, либо вообще не учитываются.

Доказано, что разработанные методы и алгоритмы количественных оценок собственных частот, добротности и полосы пропускания акустических колебаний пригодны для ВВЭР.

Обоснован вывод о том, что для предотвращения усиления вибраций ТВЭЛ и ТВС при воздействии акустических волн необходимо и достаточно обеспечить выход их частот за пределы полосы пропускания.

Ключевые слова: вибрации, акустика, теплогидравлика, добротность, модель.

Для цитирования: Проскуряков К.Н., Аникеев А.В., Афшар И., Белова С.К., Писарева Д.А. Прогнозирование виброакустических резонансов в активных зонах атомных электрических станций с водо-водяным энергетическим реактором // Вестник МЭИ. 2019. № 6. С. 39—49. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-39-49.

Predicting Vibroacoustic Resonances in the Cores of NPPs Equipped with LWR-Type Power-Generating Reactors

K.N. Proskuryakov, A.V. Anikeev, I. Afshar, S.K. Belova, D.A. Pisareva

It has been shown that measures aimed at reducing the fretting wear of fuel assemblies and fuel rods, i.e., measures reducing the impact of cyclic loads and vibration on these components, should be taken to increase the fuel campaign and improve the fuel cycle. It has been revealed that these loads and vibration are excited mainly as a consequence of unsteady hydrodynamic processes in the coolant and imbalanced operation of the circulation pumps. It is shown that for substantiating the possibility of increasing the fuel campaign, it is necessary to identify the conditions under which the vibration level exceeds the permissible values, to identify the factors causing this exceeding, and to prevent or limit their influence. To solve these problems, the data from technical diagnostics systems consisting of miscellaneous measurement channels are used.

The importance of developing CFD codes for studying the reactor's thermal-hydraulic model and, in particular, for constructing the temperature distribution fields over the cross section at the core outlet is pointed out.

It has been stated, as a recognized conclusion, that it is impossible to study the vibration characteristics of fuel assemblies (FAs) in the operating reactor, and that attempts to model a number of most important processes that determine the totality of hydrodynamic loads at experimental facilities are not met with success. It is pointed out that there are a number of insufficiently studied phenomena and processes in the NPP equipment components that affect the vibration state of fuel assemblies and fuel rods, but in the existing system codes they are either considered in a very simplified manner or are not taken into account at all.

It is shown that the developed methods and algorithms for quantitatively estimating the natural frequencies, q-factor and acoustic vibration bandwidths are suitable for VVER-type reactors.

The conclusion stating that to prevent amplification of the fuel rod and fuel assembly vibrations under the effect of acoustic waves, it is necessary and sufficient to take measures for shifting their frequencies to beyond the bandwidth has been substantiated.

Key words: vibration, acoustics, thermal hydraulics, quality factor, model.

For citation: Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Afshar I., Belova S.K., Pisareva D.A. Predicting Vibroacoustic Resonances in the Cores of NPPs Equipped with LWR-Type Power-Generating Reactors. Bulletin of MPEI. 2019;6:39—49. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-39-49.

Введение

В настоящее время актуальная задача атомной энергетики — обоснование продления проектного срока эксплуатации энергоблоков АЭС. Для ее выполнения необходимо знать остаточный ресурс конструктивных материалов оборудования, ответственного за безопасность эксплуатации. При этом следует учитывать потерю несущей способности при воздействии циклических нагрузок [1—3], возрастающих в условиях виброакустических резонансов (ВАР). Следует отметить, что регламентом пусконаладочных работ не предусмотрено определение ВАР в режимах пуска и останова энергоблоков, их продолжительность не фиксируется и не учитывается в оценках остаточного ресурса.

Для обоснования возможности продления сроков эксплуатации нужно выявить условия, при которых уровень вибраций превысит допустимые значения, провести идентификацию причин этого превышения и, по возможности, предотвратить или ограничить их воздействие на оборудование. Для решения указанных задач используют данные систем технической диагностики, состоящих из разнообразных измерительных каналов [4, 5].

Недоисследованные явления и процессы, влияющие на вибрационное состояние тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов

Исследование вибрационных характеристик тепловыделяющих сборок (ТВС) в работающем реакторе невозможно, а на экспериментальных установках не удастся воспроизвести ряд важнейших процессов, определяющих комплекс гидродинамических нагрузок, который воздействует на ТВС и тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) во всем многообразии пусковых и эксплуатационных режимов. В мировой практике принята следующая последовательность совершенствования конструкций ТВС и ТВЭЛ: разработка опытного образца, проверка его работоспособности на экспериментальном стенде, опытная эксплуатация в реакторе, внесение конструктивных изменений (со-

провождающееся изменением собственных частот колебаний), проверка работоспособности конструкций на экспериментальном стенде, опытная эксплуатация в реакторе. При отсутствии требуемого результата указанные этапы разработки повторяются до тех пор, пока не будет обеспечена заданная долговечность и износостойкость ТВС и ТВЭЛ. Таким образом, к настоящему времени для нескольких, принятых для массового тиражирования энергоблоков АЭС, впервые с момента начала их эксплуатации удалось почти обеспечить «нулевой отказ ТВС» при незначительном увеличении числа циклов. Однако выяснилось, что ТВС и ТВЭЛ, разработанные для РWR, оказались непригодными для использования в ВВЭР, а ТВС и ТВЭЛ, разработанные для ВВЭР, не годятся для использования в реакторах РWR. Причины этого заключаются в том, что каждая модификация реакторов имеет свое индивидуальное акустическое поле [6], в котором вибрации ТВС удовлетворяют требованию не превышения допустимого уровня. Для обеспечения выполнения этого требования в ином акустическом поле необходимо соответствующее изменение конструкции ТВС. Следовательно, для каждой последующей модификации реакторной установки (РУ), имеющей свои индивидуальные геометрические размеры и мощность, придется пройти аналогичный и долгий путь для обеспечения «нулевого отказа ТВС». Следует также признать, что имеется ряд недостаточно исследованных явлений и процессов в элементах оборудования АЭС, воздействующих на вибрационное состояние ТВС и ТВЭЛ, но в существующих системных кодах они либо рассматриваются крайне упрощенно, либо вообще не учитываются. Достаточно вспомнить, что для прогнозирования и предотвращения ВАР необходимо знать частоты собственных колебаний оборудования, его элементов и их соединений, а также частоты собственных колебаний давления теплоносителя, т. е. частоты акустических стоячих волн (АСВ) в различных эксплуатационных и аварийных режимах, следовательно, нужен виброакустический паспорт оборудования АЭС. Однако виброакустическая паспортизация станций не проводится, поскольку не является обязательной частью проектной

и нормативной документации. Принципы математического моделирования механических систем известны, что позволяет анализировать как колебания ТВС (как правило, низкочастотные), так и колебания отдельных ТВЭЛ. Основными источниками возбуждения колебаний, как известно, являются нестационарные гидродинамические процессы в теплоносителе (акустические волны, турбулентность, вихреобразование, кавитация и др.) и несбалансированность вращающихся механизмов, в первую очередь циркуляционных насосов (механические силы). При этом колебательные характеристики акустической системы теплоносителя не сводятся к сумме свойств отдельных ее элементов, напротив, взаимодействие колебательных процессов в них придает системе новые свойства, отсутствующие в отдельно взятых элементах.

Указанные свойства проявляются в виде преобразования частот, с которыми внешние гидравлические возмущения действуют на контур теплоносителя РУ в целом и на его отдельные элементы (реактор, парогенератор, трубопроводы и пр.). В результате преобразования частот гидравлических возмущений (например, частоты вращения насоса) в контуре теплоносителя появляются комбинации низких (порядка долей герц) и высоких (десятки герц) частот, а также частот, кратных частотам колебаний, подводимых от внешних источников возмущений [7]. Новые качественные эффекты обусловлены системными свойствами колебательных процессов в первом контуре теплоносителя и определяются следующими факторами: нелинейной зависимостью перепада давления в элементах контура от массового расхода; асимметрией колебательных параметров в параллельных контурах (петлях) РУ; существованием критического сочетания параметров различной физической природы (теплофизические, гидродинамические, конструктивные), при котором происходит смена режимов течения (стационарного и пульсационного) [6]. Проблема выявления и устранения причин аномальных вибраций ТВС актуальна для всех стран, имеющих АЭС, поскольку ее решение позволяет увеличить срок службы ТВС. Снижение циклических нагрузок и вибраций необходимо для увеличения кампании топлива, совершенствования топливного цикла и, как следствие, сокращения объемов радиоактивных отходов, подлежащих переработке и захоронению. Кроме того, сокращение количества дефектных ТВЭЛов приведет к уменьшению количества инертных газов, выбрасываемых в атмосферу. При повышении ресурса работы оборудования, внутрикорпусных устройств (ВКУ) и ТВС достигается не только снижение удельного расхода энергии на их изготовление и обслуживание, но и значительный экономический эффект. К числу главных относят задачи прогнозирования, выявления и предотвращения условий эксплуатации, приводящих к ВАР теплоносителя с вибрациями, способствующими ускоренной деградации конструк-

ционных материалов, усталостным разрушениям ТВС, и разгерметизации ТВЭЛ. Опыт показывает, что уровень вибраций ТВС зависит от режима эксплуатации АЭС и в штатных условиях, как правило, не превышает нормативного уровня [8]. Однако это означает только то, что конструктор гарантирует лишь проектную прочность конструкции, но игнорирует влияние роста уровня вибраций, наблюдающегося в ряде режимов, на увеличение интенсивности деградации материала из-за фреттинг-коррозии. Поэтому даже для таких надежных реакторов как PWR и ВВЭР проблему обеспечения надежности ТВЭЛ и ТВС нельзя считать решенной и полностью удовлетворяющей современным требованиям эксплуатации АЭС, предусматривающим увеличение безопасности при воздействии сейсмических и ударных воздействий, кампании топлива и диапазона маневренных режимов. Интенсивность износа защитной оболочки ТВЭЛ при фреттинг-коррозии возрастет в случае ВАР, в котором частоты вибраций ТВЭЛ и/или ТВС попадают в полосу пропускания акустических колебаний теплоносителя в активной зоне реактора [9]. Частота акустических колебаний теплоносителя в активной зоне зависит от величины скорости звука в теплоносителе и от геометрических размеров активной зоны. Известно, что скорость звука в теплоносителе активной зоны резко уменьшается при наличии в нем паровых и газовых пузырьков. Однако этот фактор в проектно-конструкторских материалах не затрагивается. Результаты исследований, приведенные в [9], позволяют прогнозировать режим наступления ВАР в активной зоне при наличии в теплоносителе газовых пузырьков. Без проведения такого анализа режим ВАР оказывается скрытым для конструкторов и проектировщиков, разработчиков программы пуско-наладочных работ и эксплуатационного персонала АЭС.

Создание методов прогнозирования и предотвращения акустических колебаний теплоносителя, вызывающих усиление вибраций тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов

В результате проведенных поисковых исследований созданы методы и алгоритмы расчетов, предназначенные для прогнозирования и предотвращения условий возникновения роста вибраций ТВЭЛ и ТВС, обусловленного акустическими колебаниями теплоносителя. Исследована зависимость полосы пропускания от режима эксплуатации реакторной установки. С этой целью взята акустическая модель теплоносителя в активной зоне с учетом наличия газовой фазы, образовавшейся в процессе радиолитического распада. В исследовании [9] приведены алгоритмы расчета добротности колебательного контура теплоносителя и полосы пропускания, позволяющие указать расположение ТВС с повышенным уровнем вибраций в исследованном режиме работы ВВЭР-1000. Необходимо подчеркнуть, что по-

явление частот акустических колебаний и вибраций в полосе пропускания возможно лишь при определенном значении средней температуры теплоносителя в ТВС. На рисунке 1 темным цветом выделены ТВС, которые в исследованном пусковом режиме, согласно прогнозу, будут находиться в условиях повышенных вибраций. С учетом регламента эксплуатации АЭС и на основе результатов прогнозирования режимов, в которых возникает повышенный уровень вибраций ТВС, можно оценить интервал времени, в течение которого в переходных и маневренных режимах из ВАР будет происходить повышенный фреттинг-износ ТВС реактора ВВЭР-1000.

Разработанные методы и алгоритмы предназначены для количественных оценок собственной частоты колебаний давления теплоносителя, добротности и полосы пропускания акустических элементов первого контура и их соединений для существующих и для проектируемых установок типа ВВЭР, ВВЭР-СКД [10]. Показано, что для предотвращения резонанса колебаний теплоносителя и ТВС необходимо и достаточно вывести собственную частоту колебаний ТВС за пределы полосы пропускания теплоносителя.

В работе [11] для построения картограммы распределения температуры по сечению на выходе активной зоны разработан CFD-код (Computational Fluid Dynamics — Вычислительная гидродинамика) теплогидравлической модели реактора ВВЭР-1200, содержащий ~ 1 млрд ячеек сетки. Приняты следующие допущения:

- теплоноситель считается ньютоновской, несжимаемой жидкостью;
- течение турбулентное, используются $k-w$ SST-модель турбулентности;
- на входе распределение параметров теплоносителя равномерное;
- стенки проточного тракта адиабатические и гидравлически гладкие;
- теплофизические свойства теплоносителя зависят от температуры и не зависят от давления;
- тепловыделение в поперечном сечении ТВС постоянно.

Течение описывается нестационарными неизотермическими уравнениями Рейнольдса (URANS).

Распределение температуры по сечению на выходе активной зоны, содержащей 163 ТВС и 50856 ТВЭЛ, изображено на рис. 2.

Проведено более 30 верификационных расчетов с сопоставлением результатов расчетного исследования с экспериментальными данными. Среднеквадратичная погрешность результатов моделирования целевых параметров не превышает 10%.

В реакторах ВВЭР-1000 и АЭС-2006 располагаются базовые конструкции кассет современного поколения ТВС-2М и ТВС АЭС-2006.

В работе [12] дан расчет параметров теплоносителя в головках ТВС реакторов АЭС-2006 и ВВЭР-1000, полученных с помощью ячеечного кода SC-1 и трехмерного CFD-кода STAR-CCM+.

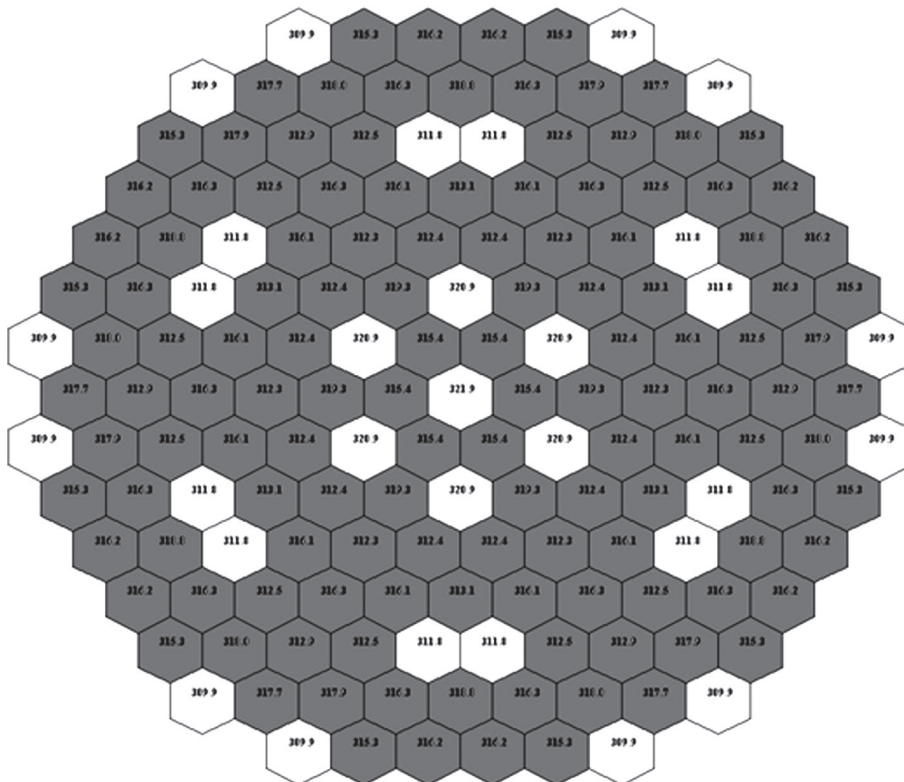


Рис. 1. Расположение ТВС с повышенным уровнем вибраций в активной зоне ВВЭР-1000 в исследованном режиме

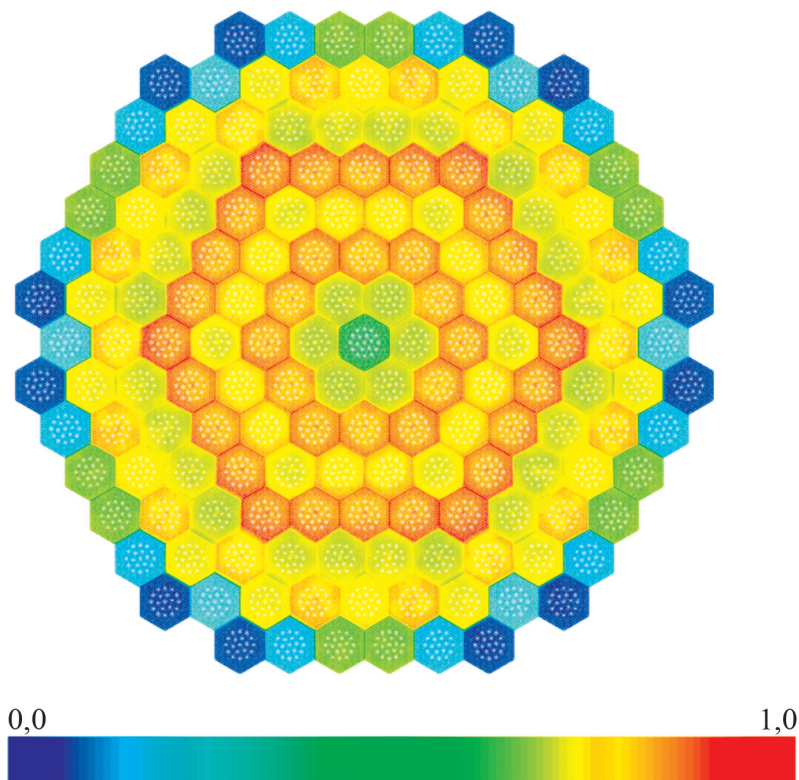


Рис. 2. Распределение температуры по сечению на выходе активной зоны

Моделируемая область для каждого типа головки состоит из верхней (цилиндрической) обечайки, демпфирующей плиты, пружинного блока, нижней обечайки, цанг и элементов, связывающих сборочные единицы головки в единую конструкцию, а также части ТВС, расположенной сразу после окончания ТВЭЛов. При моделировании течения в головках кассет использована RANS-модель турбулентности. В качестве граничных условий приняты поля скорости и температуры теплоносителя на выходе из пучка ТВЭЛов, полученные с помощью ячеечного кода SC-1. Данные передавали в программу STAR-CCM+. В результате расчетов получены значения скорости и температуры на выходе из головки ТВС, а также оценки отклонений от средней смешанной температуры на выходе из ТВС показаний термопар СВРД (АЭС 2006) и показаний штатной термопары (ВВЭР-1000).

Прогнозирование условий эксплуатации, приводящих к виброакустическим резонансам теплоносителя с вибрациями тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов

В формировании акустического поля РУ участвуют автоколебания потока теплоносителя, генерируемые в акустических элементах первого контура. В публикации [13] приведены методы определения АСВ.

Акустические элементы первого контура АЭС с ВВЭР-440 показаны на рис. 3.

Результаты расчета частот АСВ в первом контуре АЭС с ВВЭР-440 приведены в таблице [14].

В настоящее время на Нововоронежской АЭС успешно используется система контроля вибрации основного оборудования SUS, внедрены и применяются в виде пакетов программы для автоматической отбраковки спектров, выделения пиков в вибрационных спектрах [15].

Результаты расчета частоты АСВ для всех этапов сопоставлены с данными измерений вибраций основного оборудования первого контура, приведенными в [16]. Итоги сопоставления указывают на то, что в перечисленных ниже элементах оборудования АЭС в исследованных этапах пусковых режимов могут возникать резонансы АСВ с вибрациями оборудования:

► 1,5...3,0 Гц — частоты вибраций ТВС с одним закрепленным концом наблюдаются:

- в комбинационном контуре (16 + 1 + 2 + 3 + 4) от ГЗ3 холодной нитки до выхода из активной зоны в диапазонах значений температуры 281...296 °С и давления 12,1...12,3 МПа на выходе из реактора;

- в комбинационном контуре (16 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5) от ГЗ3 холодной нитки до ГЗ3 горячей нитки в диапазонах значений температуры 60...296 °С и давления 1,8...12,3 МПа на выходе из реактора;

► 4,0...6,0 Гц — частоты вибраций ТВС с двумя закрепленными концами наблюдаются:

- в комбинационном контуре (16 + 1 + 2) от ГЗ3 холодной нитки до нижней части активной зоны в диа-

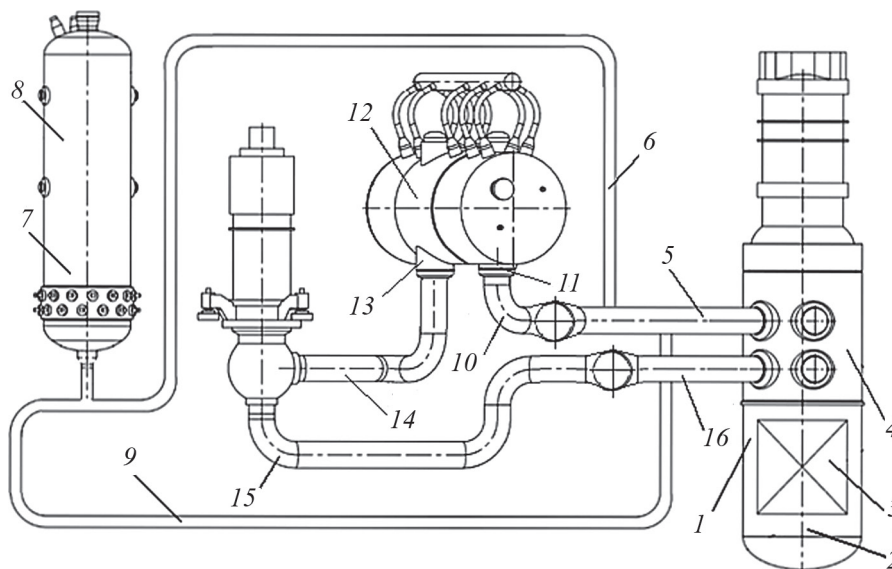


Рис. 3. Акустическая схема АЭС с ВВЭР-440:

1 — опускной участок реактора; 2 — пространство под активной зоной; 3 — активная зона; 4 — пространство над активной зоной; 5 — участок главного циркуляционного контура (ГЦК) от реактора до главной запорной задвижки (ГЗЗ); 6 — дыхательный трубопровод от горячей нитки до компенсатора давления (КД); 7 — КД (вода); 8 — КД (пар); 9 — дыхательный трубопровод от КД до горячей нитки; 10 — участок горячей нитки ГЦК от ГЗЗ до горячего коллектора; 11 — горячий коллектор ПГ; 12 — теплообменная поверхность парогенератора (ПГ); 13 — холодный коллектор ПГ; 14 — участок от холодного коллектора ПГ до главного циркуляционного насоса (ГЦН); 15 — участок холодной нитки ГЦК от ГЦН до ГЗЗ; 16 — участок холодной нитки ГЦК от ГЗЗ до входа в опускной участок реактора

Результаты расчета частот АСВ в участках акустической схемы первого контура

Параметры режима 1	$T = 256 \text{ }^\circ\text{C}; P = 12,7 \text{ кг/см}^2; H = 4,34 \text{ м}$							
Номер участка	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота, Гц	18,3	44,1	71,7	28,6	20,4	7,1	23,7	11,5
№ участка	9	10	11	12	13	14	15	16
Частота, Гц	6,7	43,6	42,5	19,3	42,6	20,7	56,9	36,3
Параметры режима 2	$T = 268 \text{ }^\circ\text{C}; P = 125 \text{ кг/см}^2; H = 3,37 \text{ м}$							
Номер участка	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота, Гц	17,7	43,1	69,2	27,6	19,5	6,8	29,5	9,9
№ участка	9	10	11	12	13	14	15	16
Частота, Гц	6,4	41,8	40,6	18,5	41,3	20,1	55,3	35,3

пазонах значений температуры 60...296 °С и давления 1,8 – 12,3 МПа на выходе из реактора;

- в комбинационном контуре (1 + 2 + 3 + 4) от начала опускного участка реактора до выхода из реактора в диапазонах значений температуры 60...136 °С и давления 1,8 – 4,8 МПа на выходе из реактора;

► 8,0...12,0 Гц — вторая мода колебаний ТВС с двумя закрепленными концами наблюдается:

- в комбинационном контуре (1 + 2 + 3) от начала опускного участка реактора до верхней части активной зоны в диапазонах значений температуры 136...296 °С и давления 4,8...12,3 МПа на выходе из реактора;

- в комбинационном контуре (1 + 2 + 3 + 4) от начала опускного участка реактора до выхода из реактора

в диапазонах значений температуры 60...136 °С и давления 1,8 – 4,8 МПа на выходе из реактора.

Излучение потоком теплоносителя упругих волн

В статье [17] приведены результаты измерений, из которых видно, что при невозмущенном турбулентном течении (без дроссельной шайбы на входе в ТВС) возникают колебания ТВС в диапазоне частот 90...95 Гц.

Расчет частоты АСВ, рождающейся в полномасштабной модели ТВС при параметрах потока воды, имевших место в указанных экспериментах, показывает, что прогнозируемая величина совпадает с результатами измерений.

Излучение потоком теплоносителя упругих волн исследовано в [18]. Создан метод акустических измерений с целью выявления опасных режимов, связанных с процессами спонтанного вихреобразования и самопроизвольной закрутки потоков теплоносителей. Он базируется на измерении амплитудно-частотных характеристик звуковых колебаний в закрученной струе. В отличие от традиционных методов неразрушающего контроля теплогидравлических параметров, таких как ультразвуковые, радиационные, магнитные, использован новый метод акустических резонансов, позволяющий регистрировать излучение средой упругих волн, вызванных локальной динамической перестройкой ее структуры и предсказывать появление опасных периодических флуктуаций, частоты которых приближаются к собственным частотам ЯЭУ. Поскольку перечисленные выше методы виброшумовой диагностики не могут детектировать в режиме реального времени, то развивается процесс возникновения и развития нежелательных для конструкций резонансных колебаний. Экспериментально установлено, что при достижении предельной расходной скорости закрученного потока происходит самопроизвольная перестройка амплитудно-частотных характеристик акустических колебаний гидромеханической системы. Резонансный (или критический) режим истечения наступает при совпадении частоты вихревого движения с собственной частотой колебаний упругой торцевой поверхности вихревой камеры. Критический режим характеризуется резким усилением амплитуды звуковых колебаний на резонансной частоте и подавлением колебаний на всех остальных частотах. Выявлено, что в резонансном режиме истечения поток распадается на отдельные спиральные вихри, частота вращения в которых совпадает с собственной частотой изгибных колебаний торцевой поверхности вихревой камеры. В специальной серии экспериментов показано, что в области критического перехода, соответствующей частотному диапазону акустических колебаний, генерируемых при образовании системы устойчивых когерентных спирально-вихревых структур, звуковое давление, регистрируемое с помощью амплитудно-частотных характеристик, возрастает на 2 — 3 порядка. Поэтому, при приближении вихревых частот к собственным частотам гидромеханической системы вероятность детектирования опасного резонансного режима возрастает вследствие резкого увеличения амплитуды сигнала. Результаты исследований направлены на разработку теоретических основ и приборного комплекса для обеспечения технологии вихревой диагностики состояния потоков теплоносителей ЯЭУ с ядерными реакторами типа ВВЭР, БН и СВБР.

Необходимость анализа прочности при совершенствовании конструкции тепловыделяющих сборок

В работе [19] представлены методики испытаний и экспериментальные результаты, полученные в

ОКБ «Гидропресс» за более чем 20 лет исследований прочности всех разработанных конструкций ТВС. Показана необходимость анализа прочности при улучшениях конструкции ТВС. Разработаны методики и проведены дореакторные испытания необлученного топлива: статические механические испытания ТВС на поперечный изгиб и определение изгибной жесткости; испытания на продольное сжатие и определение критической силы потери устойчивости; испытания на термомеханические циклические воздействия с имитацией режимов «пуск – останов» и маневрирования 20% мощности; испытания на чистый изгиб с определением чувствительности прогиба к температурному перекоосу по противоположным граням ТВС; измерение влияния кривизны ТВС на силы трения. В АО ОКБ «Гидропресс» проведены следующие работы: определение характеристик собственных и вынужденных колебаний ТВС и ТВЭЛов; испытания фрагментов ТВС на гидродинамическую вибрацию и фреттинг-износ с оценкой запаса вибропрочности оболочек ТВЭЛов в контакте с дистанционирующими решетками; испытания материалов ТВС на износ с оценкой коэффициентов износа материалов ТВС в условиях штатного воднохимического режима.

Множественные горизонтальные соударения ТВС друг с другом, динамические искривления ТВС и направляющих каналов происходят при сейсмических воздействиях. Для оценки прочности определены модальные характеристики ТВС при сейсмическом (кинематическом) возбуждении колебаний опор ТВС с большими амплитудами. Выполнено исследование процесса удара ТВС о выгородку в потоке воды при максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) 7 баллов. Проведены сейсмические испытания ТВС в составе канала регулирования реактивности на сейсмостойкость при МРЗ 7 баллов. При аварийных воздействиях для оценки прочности ТВС, регламентируемой нормативными документами, установлены силы, действующие на модель ТВС при моделировании максимальной проектной аварии (МПА) с разрывом главного циркуляционного трубопровода. Проведены испытания ТВС на падение с высоты при нарушении транспортно-технологических операций с получением результатов динамического деформирования ТВС для верификации ПО LS DYNA. Выполнены испытания ТВС на термомеханические нагрузки при МПА до температуры 650 °С. Доказано недостижение предельных состояний ТВС и ТВЭЛов в проектах всех строящихся АЭС. В публикации [20] АО «ОКБМ Африкантов» разработана конструкция ТВС-Квадрат для активной зоны реакторов PWR, по надежности, безопасности, экономичности и технологичности конкурентоспособная зарубежным аналогам. В частности, в ТВС-Квадрат вошли апробированные в ТВС для реакторов ВВЭР конструкторские решения. Одним из них является применение оригинальных перемешивающих дистанцио-

нирующих решеток, предназначенных для интенсификации процессов тепло- и массопереноса в активной зоне реактора PWR. Варианты исполнения перемешивающих решеток для ТВС-Квадрат требуют поиска оптимального конструктивного решения для таких показателей, как эффективность перемешивания потока, гидравлические потери и запас до кризиса теплоотдачи. Для изучения особенностей течения потока теплоносителя в ЯЭУ в НГТУ им. П.Е. Алексеева функционирует аэродинамический экспериментальный стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В его состав входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель, расходомерное устройство, измерительный комплекс. Исследования локальной гидродинамики в ТВС-Квадрат реактора PWR проходили на 49-стержневой модели фрагмента ТВС-Квадрат, выполненной в полном подобии натурной конструкции

Полученные в [21] результаты иллюстрируют существенную зависимость собственной частоты колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) от режима эксплуатации, а для аварийных ситуаций — от характера аварии и этапа ее развития. Известны диапазоны частот вибраций ТВС ВВЭР-440 [16]: 1,5...3,0 Гц — вибрации с одним закрепленным концом; 4,0...6,0 Гц — вибрации ТВС с двумя закрепленными концами; 8,0...12,0 Гц — вторая мода колебаний ТВС с двумя закрепленными концами.

Прогнозирование возникновения виброакустических резонансов в активных зонах атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором при авариях с потерей теплоносителя

Важным этапом в развитии методов анализа акустических систем теплоносителя в АЭС стало использование междисциплинарного подхода и обоснование правомерности электроакустических аналогий для одномерного пульсирующего потока двухфазной среды как с однозначной, так и многозначной гидродинамической характеристиками [21]. Разработанные методы позволяют учитывать влияние на скорость звука, а, следовательно, и на частоту АСВ давления, температуры, паросодержания и скоростей движения фаз в потоке двухфазной среды. Данные методы эффективны при определении акустических свойств сложных систем с несколькими степенями свободы. Они применяются для прогнозирования и предотвращения возникновения ВАР в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах, а также при сейсмических и ударных воздействиях.

Для расчета собственной частоты колебаний давления теплоносителя в парогенерирующем канале в [21] получено следующее соотношение:

$$f = \frac{a_{\text{дф}}}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_{\text{дф}}}{\rho_{\text{в}}}} (L_{\text{в}} L_{\text{дф}})^{-0.5},$$

где $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{дф}}$ — плотности теплоносителя в одно- и двухфазной областях; $L_{\text{в}}$, $L_{\text{дф}}$ — длины участков с одно-двухфазным теплоносителем; $a_{\text{дф}}$ — скорость звука в двухфазной среде; f — СЧКДТ.

В [22] показано, что расчетные значения частот АСВ, полученные при использовании метода электроакустических аналогий, разработанного для анализа акустических систем с двухфазной текучей средой [21], совпадают с результатами измерений колебаний давления теплоносителя в активной зоне реактора. Экспериментальное доказательство, приведенное в [22], правомерности использования метода электроакустических аналогий, разработанного в [21], для расчета частот АСВ в кипящих реакторах приобретает особое значение для повышения конкурентоспособности и безопасности АЭС. Прогнозирование частот АСВ и управление ими на различных этапах аварийных режимов с кипением теплоносителя в активной зоне позволит оптимизировать системы аварийного охлаждения реактора и управлять тяжелыми авариями, а также уменьшить капитальные затраты на сооружение АЭС. Разработанные методы и алгоритмы расчетов применены в [10] для количественной оценки диапазона изменения СЧКДТ для ВВЭР-1700 (реактор с быстро-резонансным спектром нейтронов) и ВВЭР-1200.

В работе [23] показано, что необходим междисциплинарный подход для решения актуальных на сегодняшний день задач: расчет частот АСВ теплоносителя в активной зоне реактора в условиях маневренных, переходных и аварийных режимов. Прогнозирование частот АСВ и управление ими на различных этапах аварийных режимов с кипением теплоносителя в ТВС позволит оптимизировать системы аварийного охлаждения реактора и уменьшить капитальные затраты на сооружение АЭС.

Один из способов подавления автоколебаний теплоносителя — применение гасителей, которые представляют собой устройства, фильтрующие акустические колебания рабочей среды и рассеивающие их энергию. Резонатор Гельмгольца относится к ряду наиболее эффективных. При проектировании резонатора важно учитывать воздействие вихревого течения в его тракте. Для этого целесообразно применение методик конечно-элементного моделирования, с использованием которых проводится расчетное обоснование схемы и оптимальных значений его акустических характеристик. Подобный метод применяет компания Aveva [24], создавшая в 2013 г. комплексную программу по всестороннему изучению и анализу вибронпряженного состояния оборудования, его внутрикорпусных устройств и трубопроводов АЭС. Программа включает в себя измерения вибронпряженного состояния оборудования и трубопроводов, определение запаса прочности в стационарном состоянии и переходных режимах.

В ней отмечается, что при оценке и прогнозировании ресурса следует учитывать гидродинамические и акустические параметры потока теплоносителя, а также текущее состояние контактов оборудования с ВКУ и строительными конструкциями. Недостаток данного подхода заключается в привязанности результатов к текущему состоянию, затрудняющей прогнозирование ресурса, сложность и высокая стоимость проведения оценочных расчетов.

В отличие от указанного подхода в [23] предложен альтернативный вариант обеспечения несущей способности конструкции оборудования ядерной установки, предусматривающий предотвращение условий возникновения максимально возможных динамических нагрузок, вызванных ВАР. В качестве наиболее эффективного средства предотвращения ВАР предлагается использование акустического фильтра типа резонатора Гельмгольца. Данное устройство подавляет акустические колебания теплоносителя, совпадающие с собственными частотами вибраций ТВС и ТВЭЛов, вынужденными колебаниями давления, вызванными работой ГЦН или внешними ударными и сейсмическими воздействиями. В публикации [25] прогнозируются негативные последствия недооценки пагубных последствий возникновения ВАР в оборудовании АЭС при землетрясении.

Литература

1. Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А. Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского гос. ун-та им. Н.И. Лобачевского, 2015.
2. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Churilov Yu.A. Models and Prediction Algorithms of Fracture of Structural Elements for Low- and High-cycle loading based on FEM // Materials Phys. and Mechanics. 2015. V. 23. Pp. 79—82.
3. Антипов А.А., Горохов А.Н., Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А. Экспериментально-теоретическое исследование усталости материалов и конструкций в условиях высокотемпературных многоцикловых нагружений // Проблемы прочности и пластичности. 2014. Вып. 76(1). С. 26—38.
4. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратур. средства). М.: Энергоиздат, 1981.
5. ГОСТ 20911—89. Техническая диагностика. Термины и определения.
6. Proskuryakov K.N. Scientific Basis for Modeling and Calculation of Acoustic Vibrations in the Nuclear Power Plant Coolant // J. Physics: Conf. Series. 2017. V. 2. Iss. 1. Pp. 001—003.
7. Прокуряков К.Н., Федоров А.И., Запорожец М.В., Волков Г.Ю. Исследования акустических стоячих волн в первом контуре АЭС с ВВЭР-440 в пусковых

Заключение

Настоящую публикацию можно считать ответом на растущее осознание необходимости открытого обсуждения и согласованных действий по повышению надежности ТВС. Обзор охватывает большое число публикаций в открытой литературе по топливу для водо-водяных реакторов и предполагает возможность специалистам сделать ряд самостоятельных выводов.

Достиженные в различных странах результаты зависят от уровня научных исследований и технологической зрелости.

В числе главных и актуальных остаются задачи прогнозирования, выявления и предотвращения условий эксплуатации, приводящих к виброакустическим резонансам теплоносителя с вибрациями ТВС и ТВЭЛ, способствующих ускоренной деградации конструкционных материалов, усталостным разрушениям и разгерметизации ТВЭЛ.

Новые возможности для достижения «нулевого отказа» открывает междисциплинарный подход для решения актуальных на сегодняшний день задач прогнозирования частот автоколебаний в теплоносителе и подавления автоколебаний в эксплуатационных и аварийных режимах.

References

1. Kapustin S.A., Churilov Yu.A., Gorokhov V.A. Modelirovanie Nelineynogo Deformirovaniya i Razrushe-niya Konstruktsiy v Usloviyakh Mnogofaktornykh Voz-deystviy na Osnove MKE. Nizhniy Novgorod: Izd-vo Nizhegorodskogo Gos. Un-ta im. N.I. Lobachevskogo, 2015. (in Russian).
2. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Churilov Yu.A. Models and Prediction Algorithms of Fracture of Structural Elements for Low- and High-cycle loading based on FEM. Materials Phys. and Mechanics. 2015;23:79—82.
3. Antipov A.A., Gorokhov A.N., Gorokhov V.A., Kazakov D.A., Kapustin S.A. Eksperimental'no-teoreticheskoe Issledovanie Ustalosti Materialov i Konstruktsiy v Usloviyakh Vysokotemperaturnykh Mnogotsiklovyykh Nagruzhений. Problemy Prochnosti i Plastichnosti. 2014;76(1): 26—38. (in Russian).
4. Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S. Osnovy Tekhnicheskoy Diagnostiki (Optimizatsiya Algoritmov Diagnostirovaniya, Apparatur. Sredstva). M.: Energoizdat, 1981. (in Russian).
5. GOST 20911—89. Tekhnicheskaya Diagnostika. Termini i Opredeleniya. (in Russian).
6. Proskuryakov K.N. Scientific Basis for Modeling and Calculation of Acoustic Vibrations in the Nuclear Power Plant Coolant. J. Physics: Conf. Series. 2017;2;1: 001—003.
7. Proskuryakov K.N., Fedorov A.I., Zaporozhets M.V., Volkov G.Yu. Issledovaniya Akusticheskikh Stoyachikh Voln v Pervom Konture AES s VVER-440 v Puskovykh Re-

режимах // Глобальная ядерная безопасность. 2016. № 2 (19). С. 59—69.

8. Драгунов Ю.Г., Дранченко Б.Н., Абрамов В.В., Хайретдинов В.У. Вибродинамические исследования в обоснование проектных решений ВВЭР // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Материалы конференции. Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2007.

9. Прокuryakov К.Н. Ядерные энергетические установки. М.: Издат. дом МЭИ, 2015.

10. Прокuryakov К.Н., Новиков К.С. Определение области виброакустических резонансов теплоносителя и ТВС в перспективных реакторах повышенной мощности // Атомная энергия. 2010. Т. 108. № 3. С. 151—154.

11. Волков В.Ю. и др. Разработка теплогидравлической CFD-модели реактора ВВЭР-1200 // Компьютерные технологии: решения прикладных задач тепломассопереноса и прочности: Материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. Нижний Новгород, 2017.

12. Бугаева В.А., Олексюк Д.А., Киреева Д.Р. Моделирование с помощью CFD-кода поля температуры теплоносителя в головках ТВС АЭС-2006 и ВВЭР-1000 // Теплофизика — 2018: Тезисы докл. науч.-техн. конф. Обнинск, 2018. С. 147.

13. Прокuryakov К.Н. Использование виброакустических шумов для диагностики технологических процессов в АЭС. М.: Изд-во МЭИ, 1999.

14. Прокuryakov К.Н., Федоров А.И., Запорожец М.В., Волков Г.Ю. Исследования акустических стоячих волн в первом контуре АЭС с ВВЭР-440 в пусковых режимах // Глобальная ядерная безопасность. 2016. № 2(19). С. 59—69.

15. Слепов М.Т. Разработка методов и интерпретация данных применительно к системам шумовой диагностики реакторных установок Нововоронежской АЭС: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Обнинск, 1999.

16. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2004.

17. Переvezentsev В.В. Экспериментальные исследования динамических характеристик пучков ТВЭЛов ТВС ВВЭР-440 // Наука и образование. 2011. № 9. [Электрон. ресурс] <http://technomag.edu.ru/doc/166963.html> (дата обращения 07.02.2012).

18. Поздеева И.Г., Митрофанова О.В. Диагностика вихревой структуры потоков теплоносителей на основе использования метода акустических резонансов // Теплофизика — 2018: Тезисы докл. науч.-техн. конф. Обнинск, 2018. С. 57—58.

19. Макаров В.В., Селезнев А.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В. Экспериментальные исследования прочности тепловыделяющих сборок реакторов с водой под давлением // Там же. С. 112—114.

20. Дмитриев С.М. и др. Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешивающей дистанцирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR // Там же. С. 101.

zhimakh. Global'naya Yadernaya Bezopasnost'. 2016;2(19): 59—69. (in Russian).

8. Dragunov Yu.G., Dranchenko B.N., Abramov V.V., Khayretdinov V.U. Vibrodinamicheskie Issledovaniya v Obosnovanie Proektnykh Resheniy VVER. Obespechenie Bezopasnosti AES s VVER: Materialy Konferentsii. Podol'sk: FGUP OKB «Gidropress», 2007. (in Russian).

9. Proskuryakov K.N. Yadernye Energeticheskie Ustanovki. M.: Izdat. Dom MEI, 2015. (in Russian).

10. Proskuryakov K.N., Novikov K.S. Opredelenie Oblasti Vibroakusticheskikh Rezonansov Teplonositelya i TVS v Perspektivnykh Reaktorakh Povyshennoy Moshchnosti. Atomnaya Energiya. 2010;108;3:151—154. (in Russian).

11. Volkov V.Yu. i dr. Razrabotka Teplogidravlicheskoj CFD-modeli Reaktora VVER-1200. Komp'yuternye Tekhnologii: Resheniya Prikladnykh Zadach Teplomassopere-nosa i Prochnosti: Materialy XII Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. Nizhniy Novgorod, 2017. (in Russian).

12. Bugaeva V.A., Oleksyuk D.A., Kireeva D.R. Modelirovanie s Pomoshch'yu CFD-koda Polya Temperatura Teplonositelya v Golovkakh TVS AES-2006 i VVER-1000. Teplofizika — 2018: Tezisy Dokl. Nauch.-tekhn. Konf. Obninsk, 2018:147. (in Russian).

13. Proskuryakov K.N. Ispol'zovanie Vibroakusticheskikh Shumov dlya Diagnostiki Tekhnologicheskikh Protsessov v AES. M.: Izd-vo MEI, 1999. (in Russian).

14. Proskuryakov K.N., Fedorov A.I., Zaporozhets M.V., Volkov G.Yu. Issledovaniya Akusticheskikh Stoyachikh Voln v Pervom Konture AES s VVER-440 v Puskovykh Rezhimakh. Global'naya Yadernaya Bezopasnost'. 2016;2(19):59—69. (in Russian).

15. Slepov M.T. Razrabotka Metodov i Interpretatsiya Danykh Primenitel'no k Sistemam Shumovoy Diagnostiki Reaktornykh Ustanovok Novovoronezhskoy AES: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Obninsk, 1999.

16. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibroshumovaya Diagnostika VVER. M.: Energoatomizdat, 2004. (in Russian).

17. Perevezentsev V.V. Eksperimental'nye Issledovaniya Dinamicheskikh Kharakteristik Puchkov TVElov TVS VVER-440. Nauka i Obrazovanie. 2011;9. [Elektron. Resurs] <http://technomag.edu.ru/doc/166963.html> (Data Obrashcheniya 07.02.2012). (in Russian).

18. Pozdeeva I.G., Mitrofanova O.V. Diagnostika Vikhrevoiy Struktury Potokov Teplonositeley na Osnove Ispol'zovaniya Metoda Akusticheskikh Rezonansov. Teplofizika — 2018: Tezisy Dokl. Nauch.-tekhn. Konf. Obninsk, 2018:57—58. (in Russian).

19. Makarov V.V., Seleznev A.V., Afanas'ev A.V., Matvienko I.V. Eksperimental'nye Issledovaniya Prochnosti Teplovyyedelayushchikh Sborok Reaktorov s Vodoy pod Davleniem. Tam zhe:112—114. (in Russian).

20. Dmitriev S.M. i dr. Zakonomernosti Formirovaniya Potoka Teplonositelya za Peremeshivayushchey Distantsiruyushchey Reshetkoy TVS-Kvadrat Reaktora PWR. Tam zhe:101. (in Russian).

21. **Проскуряков К.Н.** Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ. М.: МЭИ, 1984.

22. **Фомичев М.С.** Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1989.

23. **Проскуряков К.Н., Запорожец М.В.** Исследование акустических колебаний в реакторных установках и перспективы их использования для обоснования остаточного ресурса // Вестник МЭИ. 2016. № 5. С. 19—24.

24. **ANP-10306NP.** Comprehensive Vibration Assessment Program for U.S. EPR Reactor Internals. Techn. Rep. ARENA NP Inc., 2013.

25. **Проскуряков К.Н., Федоров А.И., Запорожец М.В.** Прогнозирование условий возникновения в первых контурах АЭС с ВВЭР виброакустических резонансов с внешними периодическими нагрузками // Теплоэнергетика. 2015. № 8. С. 17—23.

21. **Proskuryakov K.N.** Teplogidravlichesкое Vozbuzhdenie Kolebaniy Teplonositelya vo Vnutrikorpusnykh Ustroystvakh YAEU. M.: MEI, 1984. (in Russian).

22. **Fomichev M.S.** Eksperimental'naya Gidrodinamika YAEU. M.: Energoatomizdat, 1989. (in Russian).

23. **Proskuryakov K.N., Zaporozhets M.V.** Issledovanie Akusticheskikh Kolebaniy v Reaktornykh Ustanovkakh i Perspektivy Ikh Ispol'zovaniya dlya Obosnovaniya Ostatochnogo Resursa. Vestnik MEI. 2016;5:19—24. (in Russian).

24. **ANP-10306NP.** Comprehensive Vibration Assessment Program for U.S. EPR Reactor Internals. Techn. Rep. ARENA NP Inc., 2013.

25. **Proskuryakov K.N., Fedorov A.I., Zaporozhets M.V.** Prognozirovanie Usloviy Vozniknoveniya v Pervykh Konturakh AES s VVER Vibroakusticheskikh Rezonansov s Vneshnimi Periodicheskimi Nagruzkami. Teploenergetika. 2015;8:17—23. (in Russian).

Сведения об авторах:

Проскуряков Константин Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru

Аникеев Александр Викторович — кандидат технических наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

Афшар Ибрагим — аспирант кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

Белова Софья Константиновна — магистр по направлению 14.04.01 «Ядерная энергетика и теплофизика»

Писарева Дарья Андреевна — ведущий инженер АО «Атомэнергопроект»

Information about authors:

Proskuryakov Konstantin N. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru

Anikeev Aleksandr V. — Ph.D. (Techn.), Acting Head of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI

Afshar Ibragim — Ph.D.-student of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI

Belova Sofiya K. — Master's Degree in 14.04.01 «Nuclear Power and Thermophysics»

Pisareva Dariya A. — Leading Engineer of JSC «Atomenergoproekt»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 26.01.2019

The article received to the editor: 26.01.2019