

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

УДК 621.039.548.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-11-23

Динамическое взаимодействие потока теплоносителя с тепловыделяющей сборкой

К.Н. Проскуряков

Представлен обзор публикаций отечественных исследователей, направленных на реализацию концепции нулевого дефекта ТВЭЛов. Рассмотрены результаты исследований конструктивных, технологических и эксплуатационных причин разгерметизации ТВЭЛов. Цель исследований состоит в том, чтобы найти первопричину, влияющую на производительность конкретной тепловыделяющей сборки (ТВС), и внести изменения для ее устранения. Приведены результаты исследования в целях установления корреляции между деградацией дефектных ТВЭЛов и параметрами эксплуатации топлива. Проведен анализ результатов испытания моделей ТВЭЛов и ТВС для ВВЭР и ТВС-Квадрат для PWR-900 на фреттинг-износ в условиях водно-химического режима PWR. Показано, что применение метода экспериментального физического моделирования процесса фреттинг-износа на фрагментах ТВС с обеспечением подобия и переносимости результатов на штатную ТВС даёт результаты, позволяющие бороться с фреттинг-износом.

На основе обзора итогов многочисленных исследований сделаны выводы о необходимости уточнения данных об уровне гидродинамических нагрузок (в частности, при возникновении резонансов) и уточнения данных о содержании неконденсирующихся газов в теплоносителе в работающем реакторе в различных эксплуатационных режимах.

Для верификации конструкторских и технологических решений, обоснования надёжности и работоспособности ТВЭЛ и ТВС нового поколения, выработки рекомендаций по дальнейшему совершенствованию конструкций и технологии производства, созданию и аттестации расчётных кодов необходимы:

комплексные экспериментальные исследования основных закономерностей динамического взаимодействия потока теплоносителя с топливом и изменения свойств и характеристик топлива ВВЭР;

сочетание теоретических и экспериментальных методов исследований аномального роста уровня вибраций ТВЭЛ и ТВС с целью прогнозирования условий их возникновения, идентификации и предотвращения.

Уточнение этих данных позволит решить стратегические задачи увеличения глубины выгорания топлива, создания ремонтно-пригодных ТВС, обоснования работоспособности топлива в маневренных режимах и условиях повышенной мощности реакторов.

Ключевые слова: топливный цикл, выгорание, фреттинг-износ, вибрация, резонанс, режим эксплуатации, разгерметизация.

Для цитирования: Проскуряков К.Н. Динамическое взаимодействие потока теплоносителя с тепловыделяющей сборкой // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 11—23. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-11-23.

Dynamic Interaction between the Coolant Flow and Fuel Assembly

K.N. Proskuryakov

Papers written by Russian researchers on matters concerned with implementing the “Zero Fuel Rod Defect Concept” are reviewed. The results from investigations of structural, technological and operational factors causing loss of fuel rod (FR) leak tightness are considered. The purpose of these studies is to find the root cause affecting the efficiency of a particular fuel assembly (FA) and to make changes for eliminating it. The results of the study aimed at establishing a correlation between the degradation of defective FRs and the fuel operating parameters are presented. The results obtained from testing the models of FRs and FAs for VVER reactors and Kvadrat type FAs for a PWR-900 reactor for fretting-induced wear under the conditions of the PWR reactor water chemistry are analyzed. It is shown that experimental physical modeling of fretting wear for FA fragments with ensuring similarity and possibility of extending the results for the standard FA is an approach based on which fretting wear can be combated.

Based on reviewing the results of numerous investigations, conclusions are drawn about the need to refine data on the level of hydrodynamic loads (in particular, when resonances occur) and to refine data on the content of non-condensable gases in the coolant in the operating reactor under different operating conditions.

For verifying the design and technological solutions, for substantiating the reliability and operability of new-generation FRs and FAs, for elaborating recommendations on further improvement of the designs and manufacturing technology, and for developing and certifying computer codes, the following must be carried out and used:

integrated experimental investigations of the basic regularities pertaining to the dynamic interaction between the coolant flow and fuel, and the changes in the properties and characteristics of fuel for VVER-type reactors;

combined application of theoretical and experimental methods for investigating an abnormal growth of the FR and FA vibration levels in order to predict the conditions of their occurrence, and to identify and prevent them.

Refinement of these data will make it possible to solve strategic objectives such as increasing the fuel burnup depth, constructing repairable FAs, and substantiating the fuel efficiency in maneuvering modes and under the conditions of increased reactor power.

Key words: fuel cycle, burnup, fretting wear, vibration, resonance, operating mode, loss of leak tightness.

For citation: Proskuryakov K.N. Dynamic Interaction between the Coolant Flow and Fuel Assembly. Bulletin of MPEI. 2019;5:11—23. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-11-23.

Введение

В настоящее время во всех ведущих странах мира реализуется «Концепция нулевого дефекта ТВЭЛов» [1, 2], целью которой является минимизация выхода радиоактивных продуктов деления из ТВЭЛов. Под «нулевым дефектом ТВЭЛов» подразумевают сокращение количества разгерметизирующихся в процессе эксплуатации ТВЭЛов до уровня, достигнутого в ведущих в атомной энергетике странах, а также в недопущении к дальнейшей эксплуатации ТВС с негерметичными оболочками ТВЭЛов, в том числе с дефектами типа «газовой неплотности». Достигнутый уровень негерметичных ТВЭЛов составляет $10^{-6} \dots 10^{-5}$, т. е. один негерметичный ТВЭЛ приходится на $10^5 \dots 10^6$ герметичных. Цель этих программ — поиск главной причины, наиболее вероятно влияющей на работоспособность конкретных ТВС, и внесение изменений для ее устранения. Содержательная часть обобщающей с первой частью настоящей публикации рассматриваемых проблем повреждения и вибрации топливных устройств заключается в анализе результатов наиболее значимых работ, проводимых российскими предприятиями в рамках отечественной программы по достижению нулевого отказа в ядерной энергетической установке (ЯЭУ) с ВВЭР. Согласно ей предусмотрены разработка и внедрение на базе топливных сборок нового поколения типа ТВСА и ТВС-2 ядерного топлива и перспективных топливных циклов, пригодных для эксплуатации в маневренных режимах, на повышенном уровне мощ-

ности реакторов, обеспечивающих улучшение использования топлива и повышение коэффициента использования установленной мощности реактора. В США реализуется аналогичная программа по достижению нулевого отказа американского топлива для западных проектов.

Результаты, использованные для верификации расчетных кодов

Разработаны структурная схема и рекомендации по компоновке и методическому обеспечению штатного стенда инспекции, используемые в технических проектах стендов инспекции для Балаковской АЭС, при создании стенда на Калининской АЭС и модернизации стенда Westinghouse на АЭС «Темелин» (Чехия) [3].

В [4] представлены и применены ультразвуковые методы обнаружения негерметичных ТВЭЛов в ТВС, выполнены расчетно-экспериментальные исследования акустического тракта ультразвука от излучателя через оболочку ТВЭЛа до приемника. Работа с ультразвуковыми методами обнаружения негерметичных ТВЭЛов позволила доказать, что в оболочке ТВЭЛа возбуждаются нормальные ультразвуковые волны, затухание которых зависит от граничных условий на внутренней и наружной поверхностях оболочки и от наличия дефектов в оболочке. Вода под оболочкой ТВЭЛа определяется по амплитуде и времени прихода ультразвуковой волны на приемник. При ее наличии внутри негерметичного ТВЭЛа амплитуда принятого

сигнала резко уменьшается, что является информативным признаком негерметичности оболочки.

В работе [5] приведены результаты исследования модальных характеристик пяти макетов ТВС реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и ВВЭР-1500 при силовом и кинематическом возбуждениях вибрации. Установлено, что в собственных колебаниях макетов ТВС присутствуют формы, характерные для ТВС как целого, а также свойственные отдельным элементам ТВС (ТВЭЛам, нижней опорной решетке и др.). Показано, что в колебаниях ТВС имеются изгибные и крутильные формы; первая частота изгибных колебаний макетов от 2 Гц у макета ТВС ВВЭР-1500, имитирующего «выгоревшее» состояние, до 6,9 Гц; у макета ТВС ВВЭР-440 первая частота крутильных колебаний находится в пределах от 4,5 до 16,8 Гц.

Установлено, что:

— при кинематическом возбуждении вибрации опор частоты и амплитуды колебаний ТВС на резонансах зависят от амплитуды вибрации опор;

— при увеличении амплитуды вибрации опор амплитуда и частота резонансов сначала уменьшаются, а затем при постоянной частоте увеличивается амплитуда резонансов;

— частоты собственных колебаний ТВЭЛов в пролетах между дистанционирующими решетками (ДР) определяются главным образом длиной и массой пролета;

— введение antivибрационной решетки увеличивает собственную частоту ТВЭЛа в нижнем пролете до величин более 1,6 кГц;

— появление зазоров между ТВЭЛами и ячейками ДР приводит к снижению собственной частоты ТВЭЛа на 20...30%.

Результаты исследований использованы рядом организаций для верификации расчетных кодов (ОКБ «ГИДРОПРЕСС» АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», НИЦ «Курчатовский институт») и могут быть применены для оптимизации конструкции ТВС с целью отстройки от резонансов.

В работе [6] взята модель ТВЭЛа для испытаний на вибрацию образцов узлов сопряжения оболочек ТВЭЛ с фрагментами ДР в потоке теплоносителя ВВЭР-1000 с температурой 300 °С. Показано, что испытанные конструкции узлов сопряжения ТВЭЛ – ДР ВВЭР-1000 обладают значительным запасом вибропрочности как для стальных, так и для циркониевых ДР при эксплуатации в проектных условиях.

На двух образцах ТВЭЛа в условиях сопряжения с зазором и виброускорением не менее 30 м/с² наблюдался фактически полный износ образцов, как со стороны нержавеющей, так и со стороны циркониевой ДР. Для появления фреттинг-повреждений необходимыми и достаточными условиями являются уровни виброускорений, превышающие 30 м/с² и наличие люфтов в сопряжениях ТВЭЛ – ДР. Модель ТВЭЛа использована

для испытаний на вибрацию образцов узлов сопряжения оболочек ТВЭЛ – фрагмент ДР в потоке теплоносителя ВВЭР-1000 с температурой 300 °С. На десяти моделях ТВЭЛа проведено два этапа ресурсных испытаний, каждый в объеме 750 часов, всего было испытано 20 пар образцов. На первом этапе в модели устанавливали образцы нержавеющей ДР в паре с образцами циркониевой ДР. Варьировали параметры вибрации (амплитуду и частоту виброускорений вынужденных колебаний). В процессе ревизии на 18 парах образцов ТВЭЛов и ДР с уровнями виброускорений до 30 м/с² в узлах сопряжения ТВЭЛ – ДР как с натягом, так и с зазором износа не обнаружено, кроме следов контакта. На двух образцах ТВЭЛа в условиях сопряжения с зазором и виброускорением не менее 30 м/с² наблюдался фактически полный износ образца, как со стороны нержавеющей, так и со стороны циркониевой ДР. Амплитуды виброперемещений находились в пределах 40...80 мкм, частоты — 32 и 64 Гц, нормальные контактные силы — 1...9 Н. В процессе испытаний значительная часть образцов оболочек ТВЭЛов была повреждена, некоторые — вплоть до сквозного прободения стенки образца оболочки. Проведенные исследования показали, что испытанные конструкции узлов сопряжения ТВЭЛ – ДР ВВЭР-1000 обладают значительным запасом вибропрочности как для стальных, так и для циркониевых ДР при эксплуатации в проектных условиях. Для появления фреттинг-повреждений необходимыми и достаточными условиями считаются уровни виброускорений, превышающие 30 м/с² и наличие люфтов в сопряжениях ТВЭЛ – ДР.

Результаты исследований, проведенных по проекту «ТВС-Квадрат»

Крайне важным продолжением исследований фреттинг-повреждений является заключение первого коммерческого контракта на поставку ядерного топлива ТВС-Квадрат для шведской АЭС, построенной по западному дизайну [7]. Для участия в качестве конкурентоспособного партнера на рынке готового ядерного топлива для реакторов, разработанных зарубежными производителями, ТВЭЛ создал собственную сборку наиболее распространенного формата 17×17 для западных PWR — так называемый проект «ТВС-Квадрат» (ТВС-К). Возможность использования данной ТВС в западных реакторах обсуждалась на переговорах, в частности, в Китае, Франции, США. Четыре тестовые сборки были впервые загружены в реактор в июне 2014 г. на энергоблоке №3 шведской АЭС «Рингхальс». Коммерческие поставки российских ТВС для западных реакторов могут начаться не ранее 2020-х гг. Актуальность подобных работ определяется отраслевой задачей Госкорпорации «Росатом» по улучшению существующих и созданию ЯЭУ нового поколения с характеристиками, лучшими, чем у зарубежных аналогов.

Перед производителями и поставщиками ядерного топлива поставлены стратегические задачи:

- увеличения глубины выгорания топлива;
- повышения эксплуатационного ресурса и надёжности тепловыделяющих сборок (ТВС) и ТВЭЛов;
- реализации безопасных, экономически эффективных и гибких топливных циклов (ТЦ);
- создания ремонтпригодных ТВС;
- обоснования работоспособности топлива в маневренных режимах и условиях повышенной мощности реакторов.

В статье [8] представлены результаты исследований по обоснованию износостойкости ТВЭЛов в контакте с ДР ТВС ВВЭР-1000 и ТВС российского проекта по западному дизайну. Продемонстрированы результаты трёх этапов испытаний: моделей ТВЭЛов ТВС ВВЭР на фреттинг-износ в условиях водно-химического режима ВВЭР; моделей различных конструктивных исполнений ТВЭЛов ТВС ВВЭР на фреттинг-износ в «стоячей холодной воде»; моделей ТВЭЛов ТВС-Квадрат для PWR-900 на фреттинг-износ в условиях водно-химического режима PWR.

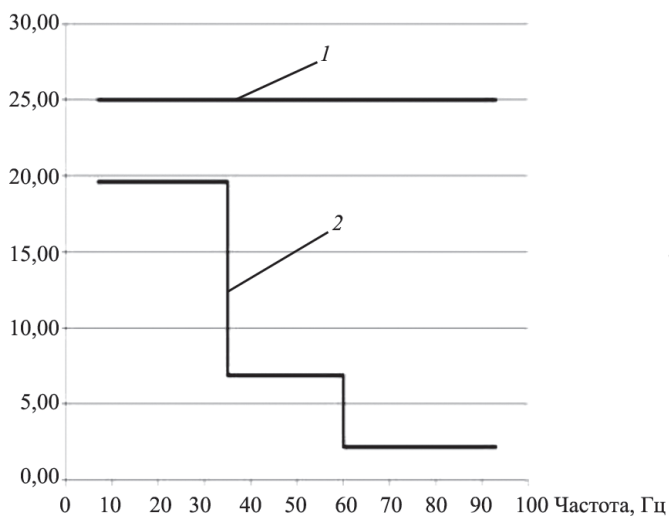
Для исследования процессов фреттинг-износа ТВС при частоте вибраций 5...200 Гц указанный интервал был разбит на четыре диапазона: 7...15, 15...35, 35...60 и 60...200 Гц [8]. Первые два диапазона содержат частоты акустической стоячей волны и оборотную частоту циркуляционного насоса, последние два — собственные частоты пролетов 394 и 522 мм (второй и третий пролеты снизу, соответственно). Широкополосная вибрация в указанных диапазонах заменена виброэквивалентом на фиксированных частотах из данных диапазонов. Выбраны частоты: 10 (близкая к частоте стоячей

акустической волны), 25 (оборотная частота циркуляционного насоса), 45 (собственная частота пролета 522 мм) и 80 Гц (собственная частота пролета 394 мм). На первом этапе в число варьируемых параметров входило расстояние между пуклевками. Зависимости от данного фактора не было обнаружено, поэтому и на втором этапе расстояние задавали в одном диапазоне для всех моделей. По результатам испытаний для каждого сочетания «частота – амплитуда» определены средние по всем узлам контакта скорости износа. Представлена зависимость средней скорости фреттинг-износа от среднего квадратического значения (СКЗ) перемещения для частот 10 и 25 Гц. При СКЗ перемещений менее 25 мкм износа образцов не обнаружено, в диапазоне от 25 до 100 мкм находится переходная область. На основе значений перемещений средин пролетов моделей, на которых отсутствовал износ, построена граница области отсутствия износа (рисунок).

Полученные экспериментальные данные позволили авторам обосновать вибрационную прочность ТВС-Квадрат в частотном диапазоне выше 35 Гц.

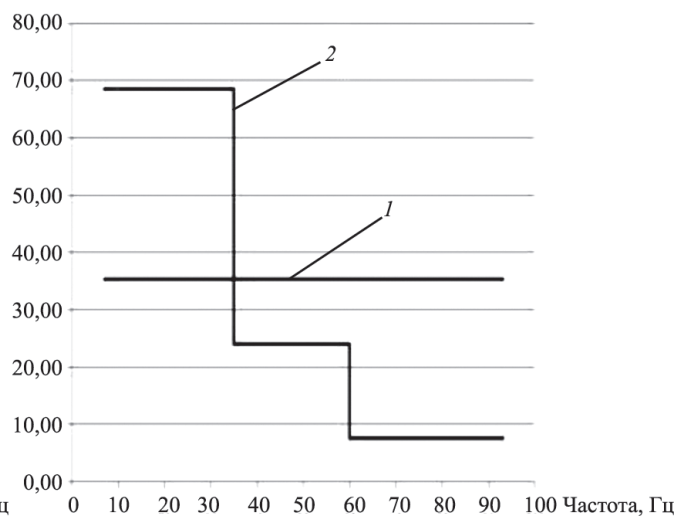
Метод экспериментального физического моделирования процесса фреттинг-износа на фрагментах ТВС с обеспечением подобия и переносимости результатов на штатную ТВС несомненно даёт конструктору наглядные знания, позволяющие бороться с фреттинг-износом. Такой же метод применялся за рубежом [9]. Нельзя не согласиться и с выводом авторов [8] о необходимости уточнения данных об уровне гидродинамически возбуждаемой вибрации ТВЭЛов в этом диапазоне, к этому следует добавить и необходимость уточнения данных о содержании неконденсирующихся газов в теплоносителе в работающем реакторе.

СКЗ перемещения, мкм



а

Амплитуда перемещения, мкм



б

Граница области отсутствия фреттинг-износа и уровень вибраций ТВЭЛов макета ТВС-Квадрат на однокассетном стенде горячей обкатки:

а — диаграмма уровня вибраций ТВЭЛов и границы отсутствия износа (по СКЗ); б — диаграмма уровня вибраций ТВЭЛов и границы отсутствия фреттинг-износа (по амплитудным значениям); 1 — граница области отсутствия износа; 2 — уровень на ГО

Послереакторные исследования полномасштабных ТВС и ТВЭЛ

В Акционерном обществе «Государственный научный центр Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР») выполнены исследования [10 — 49], выявившие основные закономерности изменения свойств и характеристик топлива ВВЭР нового поколения в период эксплуатации по результатам комплексных послереакторных исследований.

В указанных работах даны результаты исследований свойств и характеристик материалов и конструкций ТВСА и ТВС-2 ВВЭР-1000.

Для верификации конструкторских и технологических решений, обоснования надёжности и работоспособности изделий, выработки рекомендаций по дальнейшему совершенствованию конструкций и технологии производства, создания и аттестации расчётных кодов необходимы комплексные экспериментальные данные по основным закономерностям изменения свойств и характеристик нового поколения ТВС и ТВЭЛов в процессе их эксплуатации в составе ЯЭУ. Для решения указанной проблемы проводятся послереакторные исследования полномасштабных ТВС и ТВЭЛов, содержащих те или иные усовершенствованные конструктивных элементов и/или изготовленных с применением новых технологических подходов. Следует вспомнить, что первым каркасом ТВС ВВЭР-1000 был чехол кассеты пятого блока Нововоронежской АЭС, который по механическим характеристикам был и остается наиболее прочной и жесткой основой ТВС, защищающей ее от проектных нагрузок и сохраняющей проектную геометрию. Однако чехол, как непроницаемый барьер, препятствует межкассетному перемешиванию теплоносителя, снижает теплотехнические качества активной зоны, а также исключает возможность визуальной инспекции пучка ТВЭЛов.

В дальнейшем развитие конструкции пошло в направлении безчехловых ТВС. В мировой практике на основании анализа результатов многолетних исследований установлены причины и механизмы разгерметизации ТВЭЛов [18 — 29]: технологические дефекты оболочек, концевых деталей и сварных швов, топливных таблеток, ТВС и их компонентов; влага в топливе или другие водородсодержащие примеси в ТВЭЛе; превышение проектного выгорания и (или) мощности, нерегламентированные переходные режимы; гидродинамическое несовершенство конструкции активной зоны (corebaffle) или ТВС (fuelbaffle); нарушение водно-химического режима, загрязнение теплоносителя; засорение теплоносителя посторонними твердыми частицами (debris); отложения продуктов коррозии; повреждение в процессе транспортно-технологических операций.

Для подготовки данных по основным параметрам эксплуатации дефектных ТВС использованы материа-

лы отчетов АЭС. Результаты исследований негерметичных ТВС, которые эксплуатировались на энергоблоках АЭС России и Украины в период с 1983 по 2005 гг. в течение 1 — 4 топливных кампаний (ТК) приведены в [30 — 35]. На основе данных по эксплуатации дефектных ТВС оценены длительности эксплуатации негерметичных ТВЭЛов и их линейные мощности.

Уменьшение количества топливной композиции в негерметичных ТВЭЛлах определяли по результатам металлографии и результатам гамма-сканирования [34, 35, 42]. Результаты исследования в целях установления корреляции между деградацией дефектных ТВЭЛов и параметрами эксплуатации топлива (тепловой поток и время до вторичного отказа в календарных сутках) приведены в [43, 44]. Степень вторичной деградации ТВЭЛов сильно зависит не только от положения и типа первичного дефекта, но и от его размера. Это связано с тем, что в случае крупных сквозных дефектов скорость попадания пара внутрь ТВЭЛов велика, и это приводит к образованию дополнительной защитной оксидной пленки на внутренней поверхности оболочек и затрудняет достижение «критической» концентрации водорода внутри ТВЭЛов [18, 45 — 47]. Результаты исследования причин разгерметизации и послеексплуатационного состояния негерметичных ТВЭЛов ВВЭР-1000 показаны в [50 — 52].

Изучение и выявление закономерностей изменения служебных свойств и характеристик при эксплуатации изделий, созданных по новым проектам топливных сборок: ТВСА и ТВС-2 ВВЭР-1000, проведено путем выполнения комплексных послереакторных исследований, в ходе которых решались следующие задачи:

- исследование закономерностей формоизменения полномасштабных ТВСА и ТВС-2, их несущих каркасов и конструктивных элементов (пружинных блоков, пружин, циркониевых направляющих каналов (ЦНК) и дистанционирующих решёток (ЦДР), уголков жёсткости), отработавших на действующих энергоблоках АЭС в течение 1...6 топливных циклов;

- экспериментальное обоснование работоспособности ТВЭЛов ВВЭР-1000, отработавших в составе ТВС нового поколения, при их эксплуатации в стационарных режимах до выгораний топлива ~ 72 МВт-сут/кг U;

- отработка в условиях исследовательских защитных камер основных элементов технологических операций ремонта негерметичных ТВСА и ТВС-2 ВВЭР-1000, демонтажа и монтажа на ТВС головок, определение основных закономерностей извлечения и установки ТВЭЛов в пучки;

- исследование причин разгерметизации ТВЭЛов ВВЭР-1000;

- выявление основных закономерностей распределения первичных и вторичных дефектов их оболочек по длине;

- определение условий разрушения негерметичных ТВЭЛов в процессе их извлечения из конструкции ТВС;

— оценка влияния конструкторско-технологических изменений на надежность и безопасность эксплуатации ТВС нового поколения в разрезе предупреждения разгерметизации ТВЭЛов;

— создание современной информационной базы данных результатов послереакторных исследований ТВС и ТВЭЛов ВВЭР, предназначенной для расчета технологических процессов, с целью улучшения и оптимизации технологических процессов изготовления ТВС, повышения их надежности.

В ходе выполнения поставленных задач получены новые результаты, позволяющие сделать ряд важных практических выводов. В результате исследований и сравнительного анализа закономерностей формоизменения полномасштабных ТВСА, ТВС-2 и ТВС предыдущих поколений (чехловых, серийных и УТВС), их несущих каркасов и конструктивных элементов подтверждена высокая геометрическая стабильность ТВС ВВЭР-1000 нового поколения при эксплуатации до выгорания топлива 55 МВт·сут/кг U. При испытаниях на изгибную жесткость ТВС ВВЭР-1000 установлено, что наиболее устойчивыми к формоизменению являются ТВСА и ТВС-2. На начальных этапах эксплуатации значимый вклад в общую жесткость кассет этого типа вносит пучок ТВЭЛов. С увеличением продолжительности эксплуатации изгибная жесткость определяется жесткостью несущего каркаса и меняется слабо. Доказано, что изменения, внесенные в конструкцию ТВС ВВЭР-1000 при создании ТВСА и ТВС-2, не оказывают негативного влияния на работоспособность ТВЭЛов вплоть до достижения максимальных выгораний топлива 72 МВт·сут/кг U. При выгорании топлива, превышающих 55...60 МВт·сут/кг U, после возникновения плотного контакта между топливом и оболочкой на её центральном участке происходит деформация растяжения (обратная деформация), которая обуславливает увеличение диаметра ТВЭЛа. Газовыделение из топлива не превышает 5% во всем исследованном диапазоне выгораний.

Результаты работ АО «ГНЦ НИИАР» в будущем можно будет использовать для адекватной оценки безопасного ресурса ТВЭЛов и ТВС, а также для обоснования безопасности и внедрения в эксплуатацию топлива для ВВЭР-1000 нового поколения с улучшенными характеристиками геометрической стабильности при высокой глубине выгорания топлива и увеличенного срока службы, для реализации безопасных, экономически эффективных и гибких топливных циклов, для создания технологий восстановительного ремонта ТВС.

Исследования гидродинамически возбуждаемых вибраций

Выявление механизмов возникновения вибраций ТВС — важнейший этап создания расчетных методик и выработки научно обоснованных рекомендаций по

конструктивным решениям, направленным на повышение устойчивости ТВС и ее отдельных элементов к динамическим воздействиям теплоносителя. Для анализа гидродинамически возбуждаемых вибраций необходимо описание процессов взаимодействия потока с обтекаемыми поверхностями механической колебательной системы на базе экспериментальных исследований [53]. В турбулентном потоке теплоносителя на обтекаемых поверхностях ТВЭЛов формируются случайные гидродинамические нагрузки, влияющие на характеристики вибраций ТВЭЛов и пучка в целом. Результаты систематического изучения структуры течения теплоносителя, его осредненных, пульсационных и акустических характеристик в проточных частях ядерных реакторов приведены в [54]. Гидродинамические нагрузки под воздействием турбулентного потока теплоносителя, от которых зависят характеристики вибраций ТВЭЛов и пучка в целом, исследованы в цикле работ [53 — 65]. Для обоснования надежности новых конструкций и долгосрочного прогнозирования износостойкости существующих ТВС проведены комплексный анализ вибрационных процессов, включающий стендовые исследования, расчетное моделирование и вибрационный контроль при пуско-наладочных испытаниях и в условиях эксплуатации. В публикациях [55 — 60] показано, что для отдельного стержня, либо для стержневых систем с высокой сдвиговой жесткостью, справедливы представления о том, что при изгибных деформациях стержневых систем реализуются их дискретные формы, при этом каждой форме соответствует собственная частота, а для определения абсолютных значений прогибов в любом сечении пучка достаточно знать его значение только в одном сечении, в то время, как изгибные деформации стержневых систем при малой сдвиговой жесткости могут происходить с относительными смещениями сечений, величина которых пропорциональна действующим усилиям. В этом случае формы изгибных деформаций не соответствуют представлениям в рамках модели балки Бернулли–Эйлера. Виброперемещения пучка ТВЭЛов за счет сдвиговых смещений могут оказаться более высокими вблизи зоны крепления хвостовиков ТВЭЛов в нижней опорной решетке, чем в середине пучка в условиях, когда случайные гидродинамические нагрузки вблизи нижней опорной решетки существенно превышают соответствующие значения вдали от нее. Для обоснования вибрационного состояния новых и находящихся в эксплуатации ТВС в условиях изменения с течением времени жесткостных и гидродинамических характеристик элементов конструкции необходима информация на основе сочетания теоретических исследований и экспериментальных методов изучения отдельных параметров изучаемых процессов о вибрационном состоянии ТВС.

Результаты экспериментальных исследований получены с использованием полномасштабных моделей

ТВС при обеспечении идентичности их условий закрепления в реакторе и формировании одинаковых гидродинамических нагрузок, могут быть использованы для прогнозирования поведения ТВС в реакторе при эксплуатации.

Показано, что наибольшую опасность представляют резонансы гидродинамических нагрузок с конструкциями в низкочастотной области, где располагаются собственные частоты пучка ТВЭЛ с собственными частотами до 10 Гц.

Экспериментальные исследования ограничиваются, в основном, использованием модели пучков с ограниченным количеством стержней и без воспроизведения реальных условий их дистанционирования. Конструкционное демпфирование колебаний модельных пучков существенно отличается от реализуемых в натуральных условиях колебательных процессов в ТВС. В большинстве теоретических моделей не учитывается влияние скорости течения на эффекты демпфирования колебаний. Наиболее подробная экспериментальная информация по статистическим характеристикам полей пульсаций давления на поверхности цилиндрического стержня в четырехугольной упаковке при продольном обтекании турбулентным потоком воды получена в [64]. Данные по распределениям пульсаций давления в узком диапазоне частот по периметру и длине стержня использованы для характеристики случайных гидродинамических нагрузок. Характерно, что измерялась непосредственно разность мгновенных значений пульсаций давления в одном сечении цилиндра на его противоположных образующих. Именно она и определяет уровни случайных гидродинамических нагрузок на цилиндр в заданном направлении.

Существенное влияние на вибрационные процессы оказывают структурные характеристики течения, пульсации давления на входе в пучок [65]. Получены многочисленные систематические экспериментальные данные по виброускорениям и виброперемещениям в различных сечениях пучка ТВЭЛов с использованием полномасштабных макетов ТВС ВВЭР-440 для гидродинамических условий с различными уровнями и спектральным составом пульсаций давления на входе в ТВС-2.

Обнаружена особенность изгибного деформирования пучка ТВЭЛов, заключающаяся в том, что при высокой турбулизации потока на входе в пучок амплитуды виброперемещений вблизи нижней опорной решетки могут быть соизмеримы или даже превышать значения в середине пучка. Данная особенность реализуется, например, при размещении на входе в хвостовик ТВС дроссельных шайб малого диаметра.

Установлены общие закономерности формирования полей пульсаций давления при турбулентном течении за входными решетками: экспоненциальное снижение пульсаций давления в каналах за входными решетками, влияние ее гидравлического сопротивления на начальный уровень пульсаций давления. Предложенный

механизм возбуждения колебаний пучка ТВЭЛов заключается в том, что воздействие случайных гидродинамических нагрузок на внешний ряд ТВЭЛов вызывает его изгибные деформации как единого целого. При этом случайные гидродинамические нагрузки формируются турбулентным течением в зазоре между внутренней поверхностью шестигранного чехла (чехловые ТВС ВВЭР-440) или в зазоре между ТВС (безчехловые конструкции) и внешним рядом ТВЭЛов.

Найден способ экспериментального определения случайных гидродинамических нагрузок по измеренным одновременно пульсациям давления на внутренних поверхностях шести граней чехла в одном сечении пучка и получены их статистические характеристики. Показано, что высокие уровни случайных гидродинамических нагрузок характерны для начального гидродинамического участка пучка ТВЭЛов вблизи нижней опорной решетки в условиях высоких уровней турбулизации потока на входе в пучок ТВЭЛов. В спектрах случайных гидродинамических нагрузок на начальном гидродинамическом участке при высоких уровнях турбулизации потока на входе присутствуют, главным образом, низкочастотные (до 100 Гц) составляющие. Дано соотношение, отражающее связь пульсаций давления с осредненными скоростями потока, статическим давлением и уровнем пульсаций скорости.

Для анализа процесса развития пульсаций давления в турбулентном потоке после возмущающего воздействия различных конструктивных элементов (входных решеток, дроссельных шайб, антидебризных фильтров и т. д.) разработана модель, основанная на балансе пульсационной энергии в заданном сечении канала.

В работе [65] даны результаты проведенных экспериментальных исследований динамических характеристик пучков ТВЭЛ. Сделан вывод о том, что энергия турбулентных пульсаций в любой точке за входной решеткой складывается из энергии пульсаций перед решеткой, доли потерь энергии осредненного течения собственно на решетке, преобразующихся в энергию турбулентных пульсаций, и вклада процесса диссипации энергии турбулентности в потоке до заданного сечения канала.

Заключение

Для верификации конструкторских и технологических решений, обоснования надёжности и работоспособности ТВЭЛ и ТВС нового поколения, выработки рекомендаций по дальнейшему совершенствованию конструкций и технологии производства, создания и аттестации расчётных кодов необходимы:

- комплексные экспериментальные исследования основных закономерностей динамического взаимодействия потока теплоносителя с топливом и изменения свойств и характеристик топлива ВВЭР;
- сочетание теоретических исследований и экспериментальных методов выявления причин возникнове-

ния аномального роста уровня вибраций ТВЭЛ и ТВС, с целью прогнозирования условий их возникновения, идентификации и предотвращения.

Проведение указанных работ предприятиями производителей и поставщиков ядерного топлива Госкор-

порации «Росатом» позволит решить стратегические задачи увеличения глубины выгорания топлива, создания ремонтпригодных ТВС, обоснования работоспособности топлива в маневренных режимах и условиях малой и повышенной мощности реакторов.

Литература

1. Долгов А.Б., Черников О.Г. Стратегия движения к нулевому отказу ядерного топлива // Безопасность, экономика и эффективность атомной отрасли: Материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. М.: Росатом, 2016. С. 1—21.
2. Трипотень Е. О ходе реализации стратегии движения к «нулевому отказу» ядерного топлива // Атомный эксперт. 2016. № 6 (48). С. 50—55.
3. Павлов С.В. Методология материаловедческих исследований ТВС и ТВЭЛОВ ВВЭР для оперативного сопровождения внедрения нового топлива на АЭС // Известия вузов. Серия «Ядерная энергетика». 2014. № 3. С. 25—34.
4. Павлов С.В. Ультразвуковой метод обнаружения негерметичных тепловыделяющих элементов ядерных реакторов // Дефектоскопия. 2011. № 5. С. 23—38.
5. Макаров В.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В. Модальный анализ макетов ТВС реакторов ВВЭР при силовом и кинематическом возбуждении вибрации // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2007. С. 1—15.
6. Макаров В.В., Дроздов Ю.Н., Драгунов Ю.Г. Экспериментальные исследования фреттинг-коррозии ТВЭЛОВ в дистанционирующих решетках тепловыделяющих сборок водоводяных энергетических реакторов // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2005. С. 1—7.
7. Drozdov Yu.N. e. a. Analytical and Experimental Studies of Fretting-corrosion and Vibrations of Fuel Assemblies of a VVER-1000 Water-cooled and Water Moderated Power Reactor // Proc. ICAPP. Nice, 2007. P. 7536.
8. Макаров В.В., Егоров Ю.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В. Экспериментальные исследования стойкости к фреттинг-износу ТВЭЛОВ ТВС ВВЭР-1000 и ТВС Квадрат // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Обеспечение безопасности АЭС». 2015. № 35. С. 84—93.
9. Brown C.A., Adams F.T., Cooke G.C., Koebeke K., Stabel J. Influence of Fuel Rod Vibration and Fretting Impact on Reliability // Proc. Intern. Meeting on LWR Fuel Performance. Orlando, 2004. P. 1059.
10. Марков Д.В. и др. Причины разгерметизации и послереакторное состояние негерметичных ТВЭЛОВ ВВЭР и РБМК // Атомная энергия. 2005. № 5. С. 376—380.

References

1. Dolgov A.B., Chernikov O.G. Strategiya Dvizheniya k Nulevomu Otkazu Yadernogo Topliva. Bezopasnost', ekonomika i effektivnost' atomnoy otrasli: Materialy KHKH Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. M.: Rosatom, 2016:1—21. (in Russian).
2. Tripoten' E. O Khode Realizatsii Strategii Dvizheniya k «Nulevomu Otkazu» Yadernogo Topliva. Atomnyy Ekspert. 2016;6 (48):50—55. (in Russian).
3. Pavlov S.V. Metodologiya Materialovedcheskikh Issledovaniy TVS i TVELov VVER dlya Operativnogo Soprovozhdeniya Vnedreniya Novogo Topliva na AES. Izvestiya Vuzov. Seriya «Yadernaya Energetika». 2014;3:25—34. (in Russian).
4. Pavlov S.V. Ul'trazvukovoy Metod Obnaruzheniya Negermetichnykh Teplovydelyayushchikh Elementov Yadernykh Reaktorov. Defektoskopiya. 2011;5:23—38. (in Russian).
5. Makarov V.V., Afanas'ev A.V., Matvienko I.V. Modal'nyy Analiz Maketov TVS Reaktorov VVER pri Silovom i Kinematicheskom Vozbuzhdenii Vibratsii. Obespechenie Bezopasnosti AES s VVER: Materialy V Mezhdunar. Nauch.-tekhn. konf. Podol'sk: FGUP OKB «Gidropress», 2007:1—15. (in Russian).
6. Makarov V.V., Drozdov Yu.N., Dragunov Yu.G. Eksperimental'nye Issledovaniya Fretting-korrozii TVELov v Distantsioniruyushchikh Reshetkakh Teplovydelyayushchikh Sborok Vodovodyanykh Energeticheskikh Reaktorov. Obespechenie Bezopasnosti AES s VVER: Materialy IV Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Podol'sk: FGUP OKB «Gidropress», 2005:1—7. (in Russian).
7. Drozdov Yu.N. e. a. Analytical and Experimental Studies of Fretting-corrosion and Vibrations of Fuel Assemblies of a VVER-1000 Water-cooled and Water Moderated Power Reactor. Proc. ICAPP. Nice, 2007:7536.
8. Makarov V.V., Egorov Yu.V., Afanas'ev A.V., Matvienko I.V. Eksperimental'nye Issledovaniya Stoykosti k Fretting-iznosu TVELov TVS VVER-1000 i TVS Kvadrat. Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Obespechenie Bezopasnosti AES». 2015;35:84—93. (in Russian).
9. Brown S.A., Adams F.T., Cooke G.C., Koebeke K., Stabel J. Influence of Fuel Rod Vibration and Fretting Impact on Reliability. Proc. Intern. Meeting on LWR Fuel Performance. Orlando, 2004:1059.
10. Markov D.V. i dr. Prichiny Razgermetizatsii i Poslerekatornoe Sostoyanie Negermetichnykh TVELov VVER i RBMK. Atomnaya Energiya. 2005;5:376—380. (in Russian).

11. **Markov D.V., Pavlov S.V., Novoselov A.Ye.** New Generation VVER and RBMK Fuel: Results of Post-irradiation Examinations, Justification of Operational Reliability // Proc. LWR Fuel Performance: Top Fuel. Orlando, 2010. P. 006.
12. **Сухих А.В., Павлов С.В., Марков Д.В.** Использование импульсного метода вихретокового контроля для дефектоскопии облучённых ТВЭЛов ВВЭР // Атомная энергия. 2009. Т. 107. № 2. С. 115—118.
13. **Волков Б.Ю. и др.** Исследование влияния структурно-технологических параметров на терморadiационную стабильность топлива ВВЭР и PWR // Атомная энергия. 2013. Т. 114. №. 6. С. 325—331.
14. **Смирнова И.М., Марков Д.В.** Результаты исследований поверхностных отложений на оболочках ТВЭЛов RBMK-1000 // Теплоэнергетика. 2010. № 7. С. 17—20.
15. **Polenok V.S., Markov D.V.** Results of Post-irradiation Examinations of Fuel Rods in Justification of 4- and 5-year Fuel Cycles // Proc. 12th Intern. Conf. Emerging Nuclear Energy Syst. Brussels, 2005. Pp. 900—909.
16. **Переvezentsev V.V., Stolotnyuk S.V.** Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления в продольно обтекаемых пучках цилиндрических элементов // Гидродинамика и безопасность АЭС: Тез. докл. отраслевой конф. Обнинск, 1999. С. 315—317.
17. **Burukin A.V., Izhutov A.L., Markov D.V.** Examination of VVER-440 Fuel Rods During and After Their Testing in the MIR Reactor Under Simulated Maneuvering Conditions // Proc. LWR Fuel Performance Meeting: Top Fuel, 2019. Pp. 714—723.
18. **Марков Д.В. и др.** База данных «FEDS» и её применение для задач реакторного материаловедения // Вопросы материаловедения. 2012. № 3(71). С. 161—168.
19. **Екидин А.А. и др.** Определение физико-химических форм изотопов йода в вентиляционной системе реакторной установки ИВВ-2м // Атомная энергия. 2016. Т. 121. № 4. С. 237—239.
20. **Пат. № 2263161 РФ.** Способ получения проб продуктов отложений с поверхности оболочек циркониевых ТВЭЛов для проведения количественного анализа / И.М. Смирнова, И.Н. Кучкина, Г.Д. Лядов, Д.В. Марков // Бюл. изобрет. 2005. № 26.
21. **Пат. № 55371 РФ.** Устройство для снятия поверхностных отложений с протяженных изделий / И.М. Смирнова, И.Н. Кучкина, Д.В. Марков, Д.С. Неугодинов // Бюл. изобрет. 2006. № 22.
22. **Мохов В.А. и др.** О точности определения основных физических характеристик, влияющих на радиационную стойкость элементов ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Обеспечение безопасности АЭС. Реакторные установки с ВВЭР». 2008. № 23. С. 26—32.
23. **Burukin A.V., Markov D.V., Mayorshina G.I.** Results of Examinations of Fission Gas Release and Fuel Structure of the WWER Fuel Rods with a Burnup of
11. **Markov D.V., Pavlov S.V., Novoselov A.Ye.** New Generation VVER and RBMK Fuel: Results of Post-irradiation Examinations, Justification of Operational Reliability. Proc. LWR Fuel Performance: Top Fuel. Orlando, 2010:006.
12. **Sukhikh A.V., Pavlov S.V., Markov D.V.** Ispol'zovanie Impul'snogo Metoda Vikhretokovogo Kontrolya dlya Defektoskopii Obluchennykh TVElov VVER. Atomnaya Energiya. 2009;107;2:115—118. (in Russian).
13. **Volkov B.Yu. i dr.** Issledovanie Vliyaniya Strukturno-tehnologicheskikh Parametrov na Termoradiatsionnyu Stabil'nost' Topлива VVER i PWR. Atomnaya Energiya. 2013;114;6:325—331. (in Russian).
14. **Smirnova I.M., Markov D.V.** Rezul'taty Issledovaniy Poverkhnostnykh Otlozheniy na Obolochkakh TVElov RBMK-1000. Teploenergetika. 2010;7:17—20. (in Russian).
15. **Polenok V.S., Markov D.V.** Results of Post-irradiation Examinations of Fuel Rods in Justification of 4- and 5-year Fuel Cycles. Proc. 12th Intern. Conf. Emerging Nuclear Energy Syst. Brussels, 2005:900—909.
16. **Perevezentsev V.V., Stolotnyuk S.V.** Amplitudno-chastotnye Kharakteristiki Pul'satsiy Davleniya v Prodol'no obtekaemykh Puchkakh Tsilindricheskikh Elementov. Gidrodinamika i Bezopasnost' AES: Tez. Dokl. Otrasevoy Konf. Obninsk, 1999:315—317. (in Russian).
17. **Burukin A.V., Izhutov A.L., Markov D.V.** Examination of VVER-440 Fuel Rods During and After Their Testing in the MIR Reactor Under Simulated Maneuvering Conditions. Proc. LWR Fuel Performance Meeting: Top Fuel, 2019:714—723.
18. **Markov D.V. i dr.** Baza Dannyykh «FEDS» i Ee Primenenie dlya Zadach Reaktornogo Materialovedeniya. Voprosy Materialovedeniya. 2012;3(71):161—168. (in Russian).
19. **Ekin A.A. i dr.** Opredelenie Fiziko-khimicheskikh Form Izotopov Yoda v Ventilyatsionnoy Sisteme Reaktornoy Ustanovki IVV-2m. Atomnaya Energiya. 2016;121;4:237—239. (in Russian).
20. **Pat № 2263161 RF.** Sposob Polucheniya Prob Produktov Otlozheniy s Poverkhnosti Obolochek Tsirkonievyykh TVElov dlya Provedeniya Kolichestvennogo Analiza. I.M. Smirnova, I.N. Kuchkina, G.D. Lyadov, D.V. Markov. Byul. Izobret. 2005;26. (in Russian).
21. **Pat № 55371 RF.** Ustroystvo dlya Snyatiya Poverkhnostnykh Otlozheniy s Protyazhennykh Izdeliy. I.M. Smirnova, I.N. Kuchkina, D.V. Markov, D.S. Neugodnikov. Byul. Izobret. 2006;22. (in Russian).
22. **Mokhov V.A. i dr.** O Tochnosti Opredeleniya Osnovnykh Fizicheskikh Kharakteristik, Vliyayushchikh na Radiatsionnyu Stoykost' Elementov VVER. Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Obespechenie Bezopasnosti AES. Reaktornye Ustanovki s VVER». 2008;23:26—32. (in Russian).
23. **Burukin A.V., Markov D.V., Mayorshina G.I.** Results of Examinations of Fission Gas Release and Fuel Structure of the WWER Fuel Rods with a Burnup of

50 MWd/kgU and Higher after their Operation Under Normal Conditions and Testing in the MIR Reactor // Proc. Water Reactor Fuel Performance Meeting. Seoul, 2008. P. 8005.

24. **Markov D.V. e. a.** State and Parameters of WWER Fuel Rods with a Burnup Achieving 73 MW·day/kgU // Ibid. P. 8003.

25. **Burukin A.V. e. a.** Characterization of WWER-1000 Fuel Rods after their Testing Under Steady-State Conditions at Increased Power and Surface Boiling // Proc. Water Reactor Fuel Performance Meeting. Paris, 2009. Pp. 914—920.

26. **Smirnov V.P. e. a.** WWER Fuel: Results of Post Irradiation Examination // Proc. Water Reactor Fuel Performance Meeting. Kyoto, 2005. Pp. 217—226.

27. **Markov D.V. e. a.** WWER Fuel: Results of Post Irradiation Examination // Proc. European Nuclear Conf. Versailles, 2006. P. 0009.

28. **Smirnov V.P. e. a.** WWER Fuel: Results of Post Irradiation Examination // Proc. VI Intern. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs. Fontevraud, 2006. Pp. A092—T09.

29. **Markov D.V. e. a.** Results of Post Irradiation Examinations of VVER Leaky Rods // Proc. Top Fuel. Paris, 2009. Pp. 164—172.

30. **Markov D.V. e. a.** State of Fuel Rods Spent in the WWER-1000 Reactor Up to a Fuel Burnup of 75 MWd/kgU // Proc. IX Intern. Conf. VVER Fuel Performance. Helena Resort, 2011. Pp. 279—288.

31. **Smirnov A.V. e. a.** Pellet-cladding Interaction in WWER Fuel Rods // Intern. Seminar Pellet-clad Mechanical Interaction in Water Reactor Fuels. Cadarache. 2004.

32. **Burukin A.V. e. a.** Results of WWER Fuel Rods Tests in the MIR.M1 Reactor under Power Cycling Conditions // Proc. XI Intern. Conf. VVER Fuel Performance. Helena Resort, 2011. Pp. 294—303.

33. **Markov D.V. e. a.** Stability of Mechanical Properties and Geometry of New Generation WWER-1000 FAs Operated up to 6 Years // Ibid. Pp. 289—293.

34. **Smirnov A.V. e. a.** Results of Post-irradiation Examinations of WWER-1000 Fuel Rods and Uranium-gadolinium Fuel Rods in Justification of 4 and 5-year Fuel Cycles // Proc. of the V Intern. Conf. WWER Fuel Performance. Albena: Bulgarian Academy of Sciences, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, 2004. Pp. 267—272.

35. **Markov D.V. e. a.** Integration of Post-irradiation Examination Results of Failed WWER Fuel Rods // Proc. IV Intern. Conf. WWER Fuel Performance. Albena: Bulgarian Academy of Sciences, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, 2003. Pp. 273—277.

36. **Smirnov A.V. e. a.** Results of Post-irradiation Examinations of WWER-1000 Fuel Rods and Uranium-gadolinium Fuel Rods in Justification of 4 and 5-year Fuel Cycles // Proc. of the V Intern. Conf. WWER Fuel Performance. Albena: Bulgarian Academy of Sciences, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, 2004. Pp. 273—278.

50 MWd/kgU and Higher after their Operation Under Normal Conditions and Testing in the MIR Reactor. Proc. Water Reactor Fuel Performance Meeting. Seoul, 2008:8005.

24. **Markov D.V. e. a.** State and Parameters of WWER Fuel Rods with a Burnup Achieving 73 MW·day/kgU. Ibid:8003.

25. **Burukin A.V. e. a.** Characterization of WWER-1000 Fuel Rods after their Testing Under Steady-State Conditions at Increased Power and Surface Boiling. Proc. Water Reactor Fuel Performance Meeting. Paris, 2009:914—920.

26. **Smirnov V.P. e. a.** WWER Fuel: Results of Post Irradiation Examination. Proc. Water Reactor Fuel Performance Meeting. Kyoto, 2005:217—226.

27. **Markov D.V. e. a.** WWER Fuel: Results of Post Irradiation Examination. Proc. European Nuclear Conf. Versailles, 2006:0009.

28. **Smirnov V.P. e. a.** WWER Fuel: Results of Post Irradiation Examination. Proc. VI Intern. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs. Fontevraud, 2006:A092—T09.

29. **Markov D.V. e. a.** Results of Post Irradiation Examinations of VVER Leaky Rods. Proc. Top Fuel. Paris, 2009:164—172.

30. **Markov D.V. e. a.** State of Fuel Rods Spent in the WWER-1000 Reactor Up to a Fuel Burnup of 75 MWd/kgU. Proc. IX Intern. Conf. VVER Fuel Performance. Helena Resort, 2011:279—288.

31. **Smirnov A.V. e. a.** Pellet-cladding Interaction in WWER Fuel Rods. Intern. Seminar Pellet-clad Mechanical Interaction in Water Reactor Fuels. Cadarache. 2004.

32. **Burukin A.V. e. a.** Results of WWER Fuel Rods Tests in the MIR.M1 Reactor under Power Cycling Conditions. Proc. XI Intern. Conf. VVER Fuel Performance. Helena Resort, 2011:294—303.

33. **Markov D.V. e. a.** Stability of Mechanical Properties and Geometry of New Generation WWER-1000 FAs Operated up to 6 Years. Ibid:289—293.

34. **Smirnov A.V. e. a.** Results of Post-irradiation Examinations of WWER-1000 Fuel Rods and Uranium-gadolinium Fuel Rods in Justification of 4 and 5-year Fuel Cycles. Proc. of the V Intern. Conf. WWER Fuel Performance. Albena: Bulgarian Academy of Sciences, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, 2004: 267—272.

35. **Markov D.V. e. a.** Integration of Post-irradiation Examination Results of Failed WWER Fuel Rods. Proc. IV Intern. Conf. WWER Fuel Performance. Albena: Bulgarian Academy of Sciences, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, 2003:273—277.

36. **Smirnov A.V. e. a.** Results of Post-irradiation Examinations of WWER-1000 Fuel Rods and Uranium-gadolinium Fuel Rods in Justification of 4 and 5-year Fuel Cycles // Proc. of the V Intern. Conf. WWER Fuel Performance. Albena: Bulgarian Academy of Sciences, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, 2004:273—278.

37. **Трегубов А.В. и др.** Комплекс мониторинга состояния сухих хранилищ отработанного ядерного топлива // Автоматизация процессов управления. 2017. № 2(48). С. 62—71.

38. **Смирнов В.П. и др.** Состояние ТВС ВВЭР с высоким выгоранием топлива // Послереакторные исследования в горячих камерах топливных сборок водяных реакторов и их инспекция в бассейнах выдержки. Буэнос-Айрес, 2006.

39. **Смирнов А.В. и др.** Результаты послереакторных исследований в обоснование работоспособности топлива ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 при высоких выгораниях // Научное обеспечение безопасного использования ядерных энергетических технологий: Материалы IV ежегод. конф. ЯО России. Удомля, 2003.

40. **Смирнов В.П. и др.** Результаты послереакторных исследований ТВС ВВЭР с высоким выгоранием // Опыт изготовления, эксплуатации и перспективы совершенствования топлива и топливных циклов АЭС с ВВЭР-440 (тип В-213): Материалы Российско-венгерско-финского семинара. Смоленце, 2006.

41. **Поленок В.С. и др.** Результаты послереакторных исследований ТВЭЛов и ТВЭГов в обоснование 4-х и 5-годичных топливных циклов // Междунар. совещание по программе исследований циркониевых материалов и топлива на реакторе HBWR «Халден-проекта». Лиллехаммер, 2005.

42. **Марков Д.В. и др.** Результаты послереакторных исследований ТВЭЛов ВВЭР-1000 с оболочками из сплавов Э110 и Э635 при выгораниях топлива до 72 МВт-сут/кг U // Болгаро-российский семинар по опыту эксплуатации и внедрения топлива ВВЭР-1000 нового поколения. Несебыр, 2010.

43. **Марков Д.В. и др.** Состояние ТВЭЛов, отработавших в реакторе ВВЭР-1000 до выгорания топлива 75 МВт-сут/кг U // Опыт изготовления, эксплуатации и перспективы совершенствования топлива и топливных циклов АЭС с реакторами типа ВВЭР-440: Трехсторонний науч.-техн. семинар специалистов России, Словакии и Чехии. Трнава, 2011.

44. **Марков Д.В. и др.** Состояние ТВЭЛов, отработавших в реакторе ВВЭР-1000 до выгорания топлива 75 МВт-сут/кг U // Опыт эксплуатации ядерного топлива российского производства на АЭС с ВВЭР: Украинско-российский семинар. Ровенская АЭС, 2012.

45. **Марков Д.В. и др.** Результаты послереакторных исследований облученного топлива ВВЭР с высоким выгоранием // Опыт изготовления, эксплуатации и перспективы совершенствования топлива и топливных циклов АЭС с реакторами типа ВВЭР-440: Материалы VI финско-венгерско-российского науч.-техн. семинара. Эспу, 2012.

46. **Марков Д.В. и др.** Деформирование оболочек ТВЭЛов ВВЭР-1000 из сплавов Э110, Э635 при эксплуатации до шести лет // Сборник трудов НИИЯР. 2010. № 2. С. 3—11.

37. **Tregubov A.V. i dr.** Kompleks Monitoringa Sostoyaniya Sukhikh Khranilishch Otrabotannogo Yadernogo Topliva. Avtomatizatsiya Protssosov Upravleniya. 2017; 2(48):62—71. (in Russian).

38. **Smirnov V.P. i dr.** Sostoyanie TVS VVER s Vysokim Vygoraniem Topliva. Poslereaktornye Issledovaniya v Goryachikh Kamerakh Toplivnykh Sborok Vodyanykh Reaktorov i Ikh Inspektsiya v Basseynakh Vyderzhki. Buenos-Ayres, 2006. (in Russian).

39. **Smirnov A.V. i dr.** Rezul'taty Poslereaktornykh Issledovaniy v Obosnovanie Rabotosposobnosti Topliva VVER-440 i VVER-1000 pri Vysokikh Vygoraniyakh. Nauchnoe Obespechenie Bezopasnogo Ispol'zovaniya Yadernykh Energeticheskikh Tekhnologiy: Materialy IV ezhegod. konf. YAO Rossii. Udomlya, 2003. (in Russian).

40. **Smirnov V.P. i dr.** Rezul'taty poslereaktornykh Issledovaniy TVS VVER s Vysokim Vygoraniem. Opyt Izgotovleniya, Eksploatatsii i Perspektivy Sovershenstvovaniya Topliva i Toplivnykh Tsiklov AES s VVER-440 (tip V-213): Materialy Rossiysko-vengersko-finskogo Seminara. Smolenitse, 2006. (in Russian).

41. **Polenok V.S. i dr.** Rezul'taty Poslereaktornykh Issledovaniy TVELov i TVEGov v Obosnovanie 4-kh i 5-godichnykh Toplivnykh Tsiklov. Mezhdunar. Soveshchanie po Programme Issledovaniy Tsirkonievnykh Materialov i Topliva na Reaktore HBWR «Khalden-proekta». Lillekhammer, 2005. (in Russian).

42. **Markov D.V. i dr.** Rezul'taty Poslereaktornykh Issledovaniy TVELov VVER-1000 s Obolochkami iz Splavov E110 i E635 pri Vygoraniyakh Topliva do 72 MVt-sut/kg U. Bolgaro-rossiyskiy Seminar po Opytu Eksploatatsii i Vnedreniya Topliva VVER-1000 novogo Pokoleniya. Nesebyr, 2010. (in Russian).

43. **Markov D.V. i dr.** Sostoyanie TVELov, Otrabotavshikh v Reaktore VVER-1000 do Vygoraniya Topliva 75 MVt-sut/kg U. Opyt Izgotovleniya, Eksploatatsii i Perspektivy Sovershenstvovaniya Topliva i Toplivnykh tsiklov AES s Reaktorami Tipa VVER-440: Trekhstoronniy Nauch.-tekhn. Seminar spetsialistov Rossii, Slovakii i Chekhii. Trnava, 2011. (in Russian).

44. **Markov D.V. i dr.** Sostoyanie TVELov, Otrabotavshikh v Reaktore VVER-1000 do Vygoraniya Topliva 75 MVt-sut/kg U. Opyt Eksploatatsii Yadernogo Topliva Rossiyskogo Proizvodstva na AES s VVER: Ukrainsko-rossiyskiy Seminar. Rovenskaya AES, 2012. (in Russian).

45. **Markov D.V. i dr.** Rezul'taty Poslereaktornykh Issledovaniy Obluchennogo Topliva VVER s Vysokim Vygoraniem. Opyt Izgotovleniya, Eksploatatsii i Perspektivy Sovershenstvovaniya Topliva i Toplivnykh Tsiklov AES s Reaktorami Tipa VVER-440: Materialy VI Finsko-vengersko-rossiyskogo Nauch.-tekhn. Seminara. Espu, 2012. (in Russian).

46. **Markov D.V. i dr.** Deformirovanie Obolochek TVELov VVER-1000 iz Splavov E110, E635 pri Eksploatatsii do Shesti Let. Sbornik Trudov NIIAR. 2010;2:3—11. (in Russian).

47. **Бурукин А.В., Марков Д.В., Борисов К.В., Овчинников В.А., Костюченко А.Н.** Результаты исследований работоспособности ТВЭЛов ВВЭР-1000 после испытаний в стационарном режиме при повышенной мощности и поверхностном кипении // Болгаро-российский науч.-техн. семинар по опыту эксплуатации и внедрения топлива ВВЭР-1000 нового поколения. Несебр, 2008.

48. **Гетья С.И. и др.** Опыт разработки и использования пьезорезистивных виброакселерометров для измерения вибрационных характеристик тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых ядерных реакторов // Датчики и системы. 2006. № 10. С. 25—29.

49. **Перепелкин С.О., Смирнов В.П., Марков Д.В., Поленок В.С., Жителев В.А.** Оценка выхода цезия и топлива из негерметичных ТВЭЛов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 // Опыт изготовления, эксплуатации и перспективы совершенствования топлива и топливных циклов АЭС с ВВЭР-440 (тип В-213): Российско-венгерско-финский семинар. Смоленице, 2006.

50. **Поленок В.С., Марков Д.В., Жителев В.А., Перепелкин С.О.** Причины разгерметизации и выход цезия из негерметичных ТВЭЛов ВВЭР-1000 // Реакторное материаловедение: Сб. докл. IX Росс. конф. Димитровград, 2009. С. 77—90.

51. **Поленок В.С., Марков Д.В., Жителев В.А., Перепелкин С.О.** Причины разгерметизации и выход цезия из негерметичных ТВЭЛов ВВЭР-1000 // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. М., 2010.

52. **Марков Д.В. и др.** Причины разгерметизации и послереакторное состояние негерметичных ТВЭЛов ВВЭР и РБМК // Атомная энергия. 2005. № 5. Т. 99. С. 376—379.

53. **Солонин В.И., Перевезенцев В.В.** Гидродинамически возбуждаемые вибрации пучка ТВЭЛов при различных характеристиках потока теплоносителя на входе в ТВС ВВЭР-440 // Известия вузов. Серия «Машиностроение». 2006. № 3. С. 23—29.

54. **Фомичев М.С.** Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ (ядерных электроустановок). М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 248.

55. **Solonin V., Perevezentsev V.** Hydrodynamic Load Impact on Vibrations of Fuel Element Clusters in Water-moderated Water-cooled Power Reactor (VVER) Fuel Assemblies // J. Machinery Manufacture and Reliability. 2009. V. 38. No. 4. Pp. 388—392.

56. **Солонин В.И., Сорокин Ф.Д., Перевезенцев В.В.** Демпфирование колебаний пучка ТВЭЛов чехловых тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых реакторов // Вестник МГТУ. Серия «Машиностроение». 2008. № 3. С. 75—85.

57. **Солонин В.И., Сорокин Ф.Д., Перевезенцев В.В.** Демпфирование колебаний пучка ТВЭЛов чехловых тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых реакторов // Вестник МГТУ. Серия «Машиностроение». 2009. №3. С. 57—65.

47. **Burukin A.V., Markov D.V., Borisov K.V., Ovchinnikov V.A., Kostyuchenko A.N.** Rezul'taty Issledovaniy Rabotosposobnosti TVElov VVER-1000 Posle Ispytaniy v Statsionarnom Rezhime pri Povyshennoy Moshchnosti i Poverkhnostnom Kipenii. Bolgaro-rossiyskiy Nauch.-tekhn. seminar po Opytu Ekspluatatsii i Vnedreniya Topliva VVER-1000 Novogo Pokoleniya. Nesebr, 2008. (in Russian).

48. **Getya S.I. i dr.** Opyt Razrabotki i Ispol'zovaniya P'ezorezistivnykh Vibroakselerometrov dlya Izmereniya Vibratsionnykh Kharakteristik Teplovydelyayushchikh Sborok Vodookhlazhdaemykh Yadernykh Reaktorov. Datchiki i Sistemy. 2006;10:25—29. (in Russian).

49. **Perepelkin S.O., Smirnov V.P., Markov D.V., Polenok V.S., Zhitelev V.A.** Otsenka Vykhoda Tseziya i Topliva iz Negermetichnykh TVElov VVER-440 i VVER-1000. Opyt Izgotovleniya, Ekspluatatsii i Perspektivy Sovershenstvovaniya Topliva i Toplivnykh Tsiklov AES s VVER-440 (tip V-213): Rossiysko-vengersko-finskiy Seminar. Smolenitse, 2006. (in Russian).

50. **Polenok V.S., Markov D.V., Zhitelev V.A., Perepelkin S.O.** Prichiny Razgermetizatsii i Vykhod Tseziya iz Negermetichnykh TVElov VVER-1000. Reaktornoe Materialovedenie: Sb. Dokl. IX Ross. Konf. Dimitrovgrad, 2009:77—90. (in Russian).

51. **Polenok V.S., Markov D.V., Zhitelev V.A., Perepelkin S.O.** Prichiny Razgermetizatsii i Vykhod Tseziya iz Negermetichnykh TVElov VVER-1000. Bezopasnost', Effektivnost' i Ekonomika Atomnoy Energetiki: Materialy VII Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. M., 2010. (in Russian).

52. **Markov D.V. i dr.** Prichiny Razgermetizatsii i Poslereaktornoe Sostoyanie Negermetichnykh TVElov VVER i RBMK. Atomnaya energiya. 2005;5:99: 376—379. (in Russian).

53. **Solonin V.I., Perevezentsev V.V.** Hidrodinami-cheski Vozbuzhdaemye Vibratsii Puchka TVElov pri Razlichnykh Kharakteristikakh Potoka Teplonositelya na Vkhode v TVS VVER-440. Izvestiya Vuzov. Seriya «Mashinostroenie». 2006;3:23—29. (in Russian).

54. **Fomichev M.S.** Eksperimental'naya Hidrodinamika YAEU (Yadernykh Elektroustanovok). M.: Energoatomizdat, 1989:248. (in Russian).

55. **Solonin V., Perevezentsev V.** Hydrodynamic Load Impact on Vibrations of Fuel Element Clusters in Water-moderated Water-cooled Power Reactor (VVER) Fuel Assemblies. J. Machinery Manufacture and Reliability. 2009;38;4:388—392.

56. **Solonin V.I., Sorokin F.D., Perevezentsev V.V.** Dempfirovanie Kolebaniy Puchka TVElov Chekhlovykh Teplovydelyayushchikh Sborok Vodookhlazhdaemykh Reaktorov. Vestnik MGТУ. Seriya «Mashinostroenie». 2008;3:75—85. (in Russian).

57. **Solonin V.I., Sorokin F.D., Perevezentsev V.V.** Dempfirovanie Kolebaniy Puchka TVElov Chekhlovykh Teplovydelyayushchikh Sborok Vodookhlazhdaemykh Reaktorov. Vestnik MGТУ. Seriya «Mashinostroenie». 2009;3:57—65. (in Russian).

58. Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Гидродинамическое и гидромеханическое возбуждение вибраций пучков ТВЭЛов ТВС ВВЭР-440 // Вопросы атомной науки и техники. Обеспечение безопасности АЭС. 2009. № 25. С. 50—61.

59. Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Гидродинамические нагрузки на пучок ТВЭЛов в условиях различной структуры турбулентного потока на входе в ТВС ВВЭР-440 // Теплогидравлические аспекты безопасности активных зон, охлаждаемых водой и жидкими металлами (Теплофизика-2008): Тез. докл. межведом. семинара, Обнинск, 2008. С. 56—58.

60. Перевезенцев В.В. Распределение случайных гидродинамических нагрузок по длине пучка ТВЭЛов ТВС ВВЭР // Вестник МГТУ. Серия «Машиностроение». 2011. № 4. С. 103—110.

61. Перевезенцев В.В. Вибрации и повреждения ТВЭЛов в турбулентном потоке теплоносителя в тепловыделяющих сборках ВВЭР // Безопасность в техносфере. 2011. № 6. С. 11—17.

62. Solonin V., Perevezentsev V. Hydrodynamic Load Impact on Vibrations of Fuel Element Clusters in Water-moderated Water-cooled Power Reactor (VVER) Fuel Assemblies // J. Machinery Manufacture and Reliability. 2009. No. 4. Pp. 388—392.

63. Перевезенцев В.В. Случайные гидродинамические нагрузки и вибрации ТВЭЛов в турбулентном потоке теплоносителя ТВС ВВЭР // Безопасность АЭС и подготовка кадров: Тез. докл. XII Междунар. конф. Обнинск, 2011. С. 47—49.

64. Curling, L.R., Paidoussis, M.P. Analyses for Random Flowinduced Vibration of Cylindrical Structures Subjected to Turbulent Axial Flow // J. Sound and Vibration. 2003. V. 264. Pp. 795—833.

65. Перевезенцев В.В. Экспериментальные исследования динамических характеристик пучков ТВЭЛов ТВС ВВЭР-440 // Наука и образование. 2011. № 10. С. 1—12.

58. Solonin V.I., Perevezentsev V.V. Gidrodinamicheskoe i Gidromekhanicheskoe Vozbuzhdenie Vibratsiy Puchkov TVElov TVS VVER-440. Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Obespechenie Bezopasnosti AES. 2009;25:50—61. (in Russian).

59. Solonin V.I., Perevezentsev V.V. Gidrodinamicheskie Nagruzki na Puchok TVElov v Usloviyakh Razlichnoy Struktury Turbulentnogo Potoka na Vkhode v TVS VVER-440. Teplogidravlicheskie Aspekty Bezopasnosti Aktivnykh Zon, Okhlazhdaemykh Vodoy i Zhidkimi Metallami (Teplofizika-2008): Tez. Dokl. Mezhd. Seminara, Obninsk, 2008:56—58. (in Russian).

60. Perevezentsev V.V. Raspredelenie Sluchaynykh Gidrodinamicheskikh Nagruzok po Dline Puchka TVElov TVS VVER. Vestnik MGTU. Seriya «Mashinostroenie». 2011;4:103—110. (in Russian).

61. Perevezentsev V.V. Vibratsii i Povrezhdeniya TVElov v turbulentnom Potoke Teplonositelya v Teplovydelyayushchikh Sbornakh VVER. Bezopasnost' v tekhnosfere. 2011;6:11—17. (in Russian).

62. Solonin V., Perevezentsev V. Hydrodynamic Load Impact on Vibrations of Fuel Element Clusters in Water-moderated Water-cooled Power Reactor (VVER) Fuel Assemblies. J. Machinery Manufacture and Reliability. 2009;4:388—392.

63. Perevezentsev V.V. Sluchaynye Gidrodinamicheskie Nagruzki i Vibratsii TVElov v Turbulentnom potoke Teplonositelya TVS VVER. Bezopasnost' AES i Podgotovka Kadrov: Tez. Dokl. XII Mezhdunar. Konf. Obninsk, 2011:47—49.

64. Curling, L.R., Paidoussis, M.P. Analyses for Random Flowinduced Vibration of Cylindrical Structures Subjected to Turbulent Axial Flow. J. Sound and Vibration. 2003;264:795—833.

65. Perevezentsev V.V. Eksperimental'nye Issledovaniya Dinamicheskikh Kharakteristik Puchkov TVElov TVS VVER-440. Nauka i Obrazovanie. 2011;10:1—12. (in Russian).

Сведения об авторе:

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

Information about author:

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

Статья поступила в редакцию: 26.01.2019

The article received to the editor: 26.01.2019