

УДК 621.039.5

В.И. Полуничев, А.Ф. Филимонов

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА АКТИВНЫХ ЗОН С ЦИРКОНИЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ТВС ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК СУДОВ И АСММ

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

Представлены результаты эксплуатации активных зон судовых реакторных установок с элементами ТВС из циркониевых сплавов в части ресурсных показателей. Выявлено, что достигнутый к настоящему времени ресурс не удовлетворяет современным требованиям к перспективным установкам судов и АСММ: его рост ограничивался, в основном, состоянием оболочек твэлов и других элементов ТВС из циркониевых сплавов, подверженных нодульной коррозии. Приведены некоторые результаты анализа коррозионного состояния элементов активных зон и их имитаторов из различных материалов, отработавших в судовых реакторах, экспериментальных реакторных и электрообогреваемых установках при разных тепло-гидравлических параметрах и водно-химических режимах (ВХР). По результатам анализа предложена версия возможных причин образования и характера распределения нодульной коррозии в элементах ТВС, которая базируется на особенностях условий работы судовых активных зон и дает результаты, хорошо согласующиеся с опытными данными и теоретическими выводами. Изложены предложения по изменению условий работы активных зон для повышения надежности их работы и ресурса.

Ключевые слова: активная зона судовых реакторных установок, тепловыделяющая сборка с элементами из циркониевого сплава, нодульная коррозия, ресурс.

Начиная с 1980-х гг., в активных зонах судовых реакторных установок в качестве конструкционного материала оболочек твэлов и других элементов ТВС используется цирконий. Установленный ресурс активных зон с незначительным повышением вплоть до настоящего времени сохраняется на действующих судах при существенном повышении надежности работы элементной базы и радиационной безопасности. Более существенный рост ресурса ограничивался, в основном, состоянием оболочек твэлов и других элементов из циркониевых сплавов, подверженных нодульной коррозии. Признаком интенсивности коррозионных процессов циркониевых сплавов был рост концентрации аммиака в теплоносителе первого контура [1] (рис. 1).

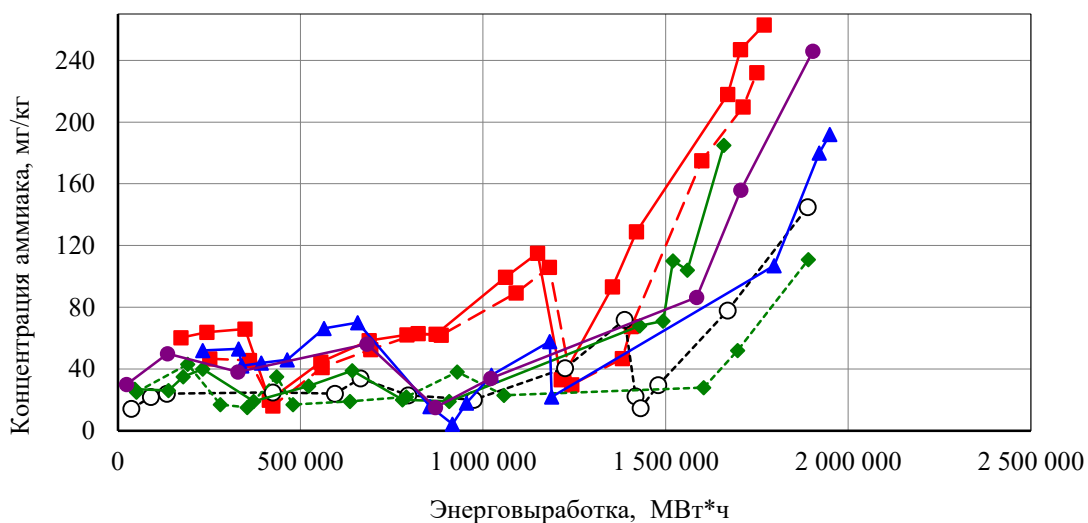


Рис. 1. Изменение концентрации аммиака в теплоносителе первого контура при эксплуатации циркониевых активных зон

Вместе с тем, тенденцией последних лет является повышение ресурсных характеристик и снижение стоимости судовых активных зон в связи с широким использованием не только на судах, но и на станциях малой мощности. Опыт эксплуатации отечественных и зарубежных АЭС и кораблей, в активных зонах которых используются циркониевые сплавы, свидетельствует об отсутствии нодульной коррозии на циркониевых оболочках твэлов при длительном ресурсе. Для реакторов PWR проектанты высказано опасение по поводу предлагаемого повышения температуры на выходе из активной зоны для повышения эффективности работы реактора из-за возникновения кипения и ускоренной коррозии оболочек твэлов [2]. Поиск причин образования нодульной коррозии циркониевых элементов ТВС судовых активных зон и характера ее распределения по поверхности ведется многие десятилетия. Рассмотрены нейтронно-физические, теплотехнические, технологические и другие возможные факторы, провоцирующие коррозию, но однозначного ответа до настоящего времени не найдено.

Результаты аналитических и экспериментальных исследований, мнения специалистов в данной области свидетельствуют о том, что основной причиной замедленного роста ресурса судовых активных зон является не конструктивное исполнение, а условия их работы. Можно обозначить следующие основные отличия условий работы судовых активных зон от зон ВВЭР:

- повышенные энергонапряженность и тепловые потоки с оболочек твэлов;
- использование газонасыщенного теплоносителя при газовой системе компенсации давления;
- малые удельные расходы теплоносителя через активную зону и, соответственно, большие температурные перепады в активной зоне;
- низкое давление теплоносителя 1 контура при достаточно высокой выходной температуре;
- наличие пристенного (в том числе «газового») кипения в недогретой воде 1 контура на элементах ТВС активных зон.

Далее предлагается краткая обобщенная информация по обоснованию одной из версий, являющаяся результатом анализа опыта эксплуатации активных зон на действующих объектах, специальных исследований на экспериментальных установках твэлов с различными материалами оболочек при разных тепло-гидравлических параметрах и ВХР. Данная версия учитывает основные особенности условий работы судовых активных зон и дает результаты, которые хорошо коррелируются с характером образования и распределения коррозии на оболочках элементов активных зон.

Испытания проводились при наличии трех зон теплообмена на оболочке твэл: конвективного, с поверхностным и объемным кипением. Максимальное коррозионное повреждение оболочки наблюдается в зоне пристенного кипения в недогретой до температуры насыщения воде [3,4]. Предполагается, что это связано с нарушением пристенного ламинарного слоя и кавитационным разрушением оксидной пленки при схлопывании пузырьков пара, микротермопульсацией на греющей поверхности в точках отрыва парогазовых пузырьков [5]. Максимальные коррозионные повреждения в данной зоне наблюдались при разных ВХР, теплофизических и гидродинамических параметрах. Увеличение степени недогрева жидкости при пристенном кипении повышает интенсивность коррозионных процессов. При отсутствии пристенного кипения коррозионные повреждения отсутствуют. В зоне объемного кипения интенсивность коррозии снижается. Таким образом, экспериментально обосновано существенное влияние пристенного кипения, в том числе «газового», в недогретой жидкости на коррозионные процессы оболочек твэлов. Как показал опыт, исключение пристенного кипения повысило надежность работы оболочек твэлов и обеспечило стабильную работу активных зон.

Результаты экспериментальных исследований ТВС РБМК-1500 и судовых ТВС с твэлами из циркониевого сплава

В конце 1970-х гг. в петле экспериментального реактора проведены теплотехнические испытания четырех ТВС РБМК-1500 с циркониевыми оболочками твэлов различного конструктивного исполнения [6]. Петля работала с проточным газовым компенсатором давления в водяном и паровом режимах с соответствующим растворением газа в теплоносителе. Через короткое время (70 суток и менее) твэлы разгерметизировались в нижней части на участке с поверхностным кипением газонасыщенной воды, недогретой до температуры кипения. На этом участке наблюдалось повышение температуры до 450-500 °С и точечные коррозионные повреждения. Было принято решение выполнить дегазацию теплоносителя в петле перед переходом из водяного режима в паровой. После этого негативные явления исчезли. Для уточнения данного явления проведены дополнительные аналогичные исследования электрообогреваемых имитаторов твэлов РБМК с контролем температур оболочки по высоте. Получены аналогичные результаты.

В конце 1980-х гг. проведены экспериментальные исследования поведения имитаторов твэлов на электрообогреваемом стенде с газонасыщенным теплоносителем при параметрах судовых РУ. Результаты исследований подтвердили наличие локальных перегревов твэлов в зоне «газового» кипения. Коррозионное состояние оболочек не контролировалось.

Результаты коррозионных исследований твэлов с оболочками из циркониевого сплава судовых активных зон в петле исследовательского реактора

Выполнены исследования коррозионных процессов на оболочках из циркониевого сплава экспериментальных твэлов в петле исследовательского реактора с газонасыщенным теплоносителем при поверхностном кипении и без него при прочих равных условиях. Результаты показали, что при поверхностном кипении имела место очаговая коррозия, при отсутствии кипения – только незначительная равномерная коррозия (рис. 2).

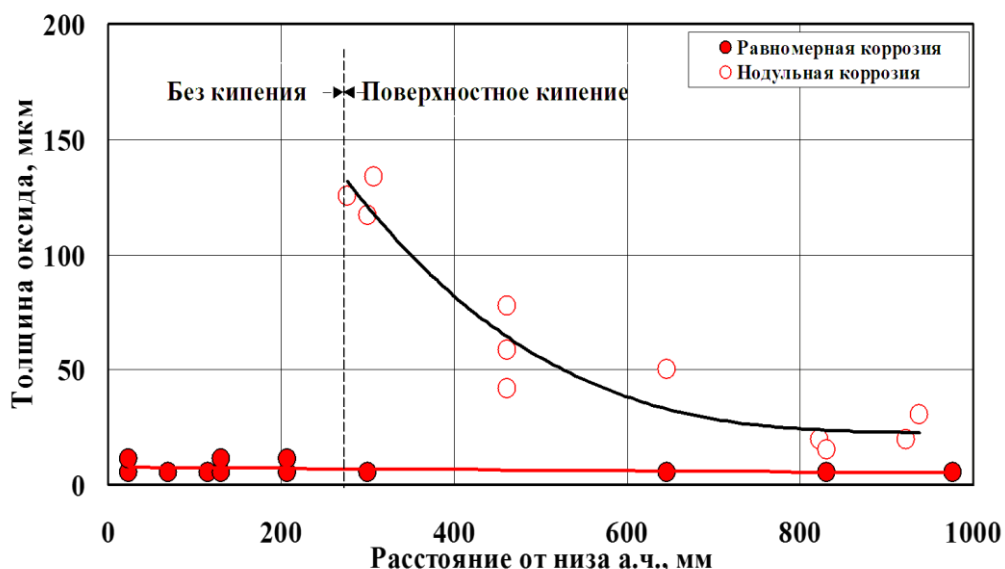


Рис. 2. Изменение характера и интенсивности коррозии по длине твэлов

Результаты коррозионных исследований твэлов с оболочками из циркониевого сплава, отработавших в активных зонах судовых реакторов

Наиболее представительную статистику представляют результаты коррозионных исследований твэлов с оболочками из циркониевых сплавов отработавших активных зон судовых реакторов [7].

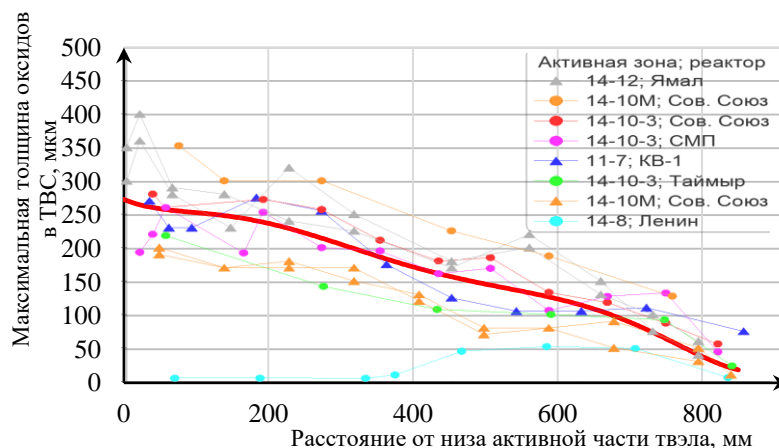


Рис. 3. Распределение максимальной толщины оксидной пленки по высоте твэлов судовых активных зон

По характеру распределения максимальной толщины оксидной пленки по высоте твэлов судовых активных зон можно определить теплотехнические характеристики теплоносителя 1 контура, которые имеют аналогичный характер изменения. Для этого рассмотрим изменение следующих параметров по высоте активной зоны: температур теплоносителя, оболочки твэлов, начала выделения газа из теплоносителя, зону пристенного кипения в номинальных условиях и при отклонении средней температуры теплоносителя в активной зоне на $+5^{\circ}\text{C}$ в режиме регулирования (применительно к активной зоне атомного ледокола «50 лет Победы»).

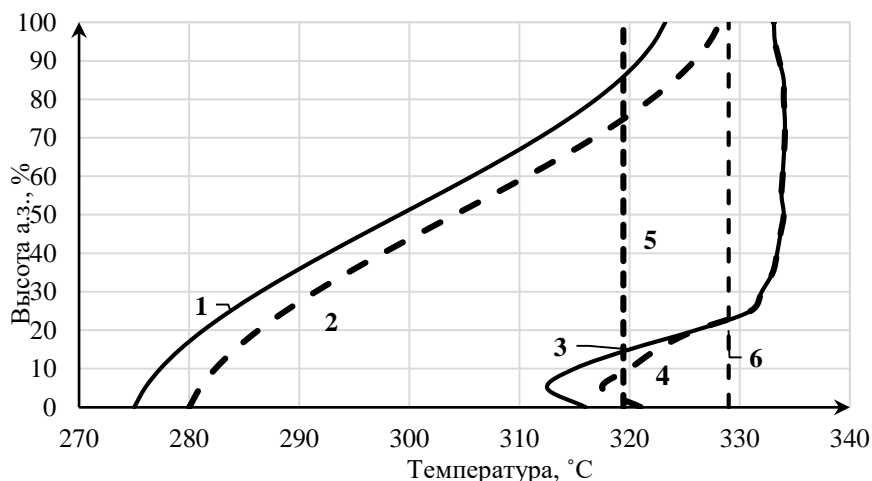


Рис. 4. Изменение температуры теплоносителя и температуры оболочки твэлов по высоте а.з. а/л «50 лет Победы» при номинальной мощности;
 1 – температура теплоносителя, 2 – температура теплоносителя $+5^{\circ}\text{C}$,
 3 – температура оболочки теплоносителя, 4 – температура оболочки теплоносителя $+5^{\circ}\text{C}$,
 5 – температура начала газыделения при давлении первого контура,
 6 – температура насыщения теплоносителя при давлении первого контура

Температура начала выделения газа из пристенного слоя твэлов определяется из равенства концентраций газа, растворенного в КД и пристенном слое (1,2):

$$C_{\text{КД}} = K(T_{\text{КД}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_S(T_{\text{КД}})) \quad (1)$$

$$C_{1\text{К}} = K(T_{\text{п.с.}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_S(T_{\text{п.с.}})) \quad (2)$$

где $C_{\text{КД}}$ – равновесная концентрация растворенного газа в воде КД; $K(T_{\text{КД}})$ – коэффициент Генри для температуры в КД; температура воды в КД 50 °С; $P_{1\text{К}}$ – давление в первом контуре (12,7 МПа); $P_S(T_{\text{КД}})$ – давление насыщенных паров воды при температуре в КД, $K(T_{\text{п.с.}})$ – коэффициент Генри при текущей температуре теплоносителя в пристенном слое, $P_S(T_{\text{п.с.}})$ – давление насыщенных паров воды при текущей температуре теплоносителя в пристенном слое, $T_{\text{п.с.}}$ – температура пристенного слоя (принята равной температуре оболочки).

Из полученного уравнения определяется $K(T_{\text{п.с.}})$ и соответствующая ему температура.

Известно, что на начальной стадии пузырьки газа, выделившегося из недогретой до температуры кипения жидкости, локализуются на поверхности [7]. При этом степень недогрева, парциальное давление газа в пузырьках и время нахождения их на поверхности твэла максимальное. С повышением температуры воды 1 контура по высоте твэла эти параметры снижаются. Естественно предположить, что условия теплоотдачи от оболочки к теплоносителю в точках контакта пузырьков наихудшие на высоте начала выделения газа, что провоцирует локальное повышение температуры и максимальный термоцикл при отрыве пузырька. Высокочастотная точечная термопульсация может вызвать разрушение поверхностного слоя оболочки твэла и интенсифицировать коррозионные процессы. Этому же способствует повышенная концентрация газов, в том числе, радиолитических, в пузырьках. Более наглядно характер распределения толщины оксидной пленки, степени недогрева и парциального давления газов приведены на рис. 5,6.

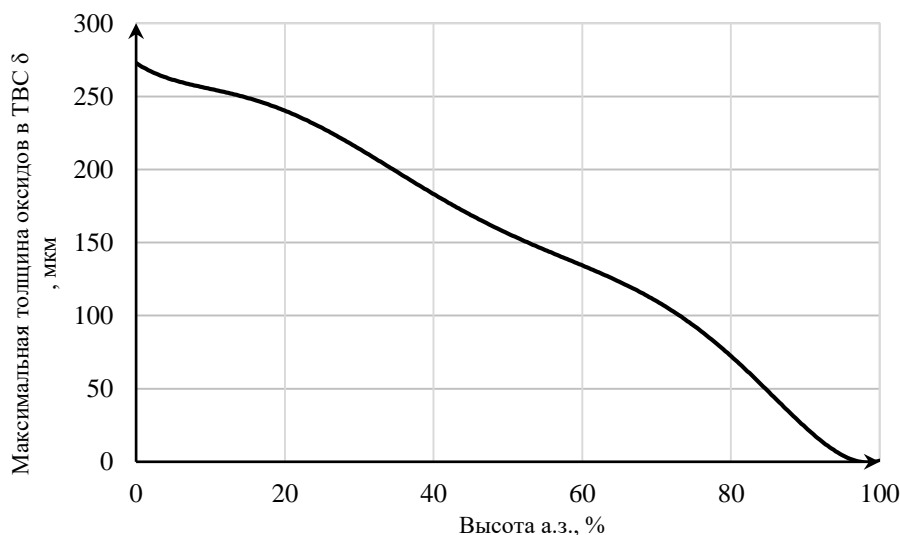
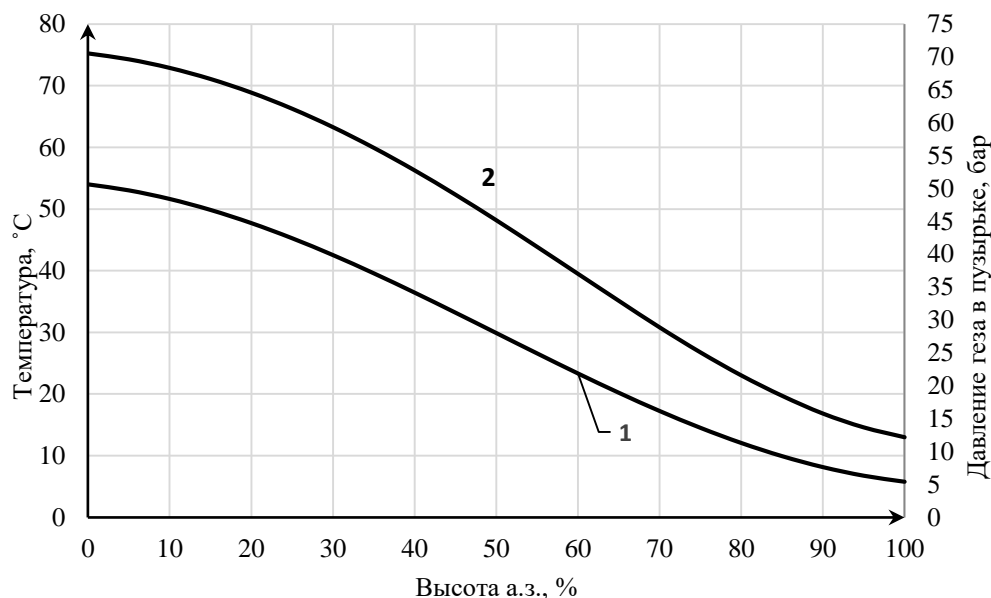


Рис. 5. Распределение максимальной толщины оксидной пленки по высоте твэлов ледокольной а.з.



**Рис. 6. 1 – Недогрев теплоносителя до температуры насыщения;
2 – Давление газа в пузырьке на поверхности оболочки
в зависимости от высоты активной зоны**

По результатам исследований коррозионного состояния оболочек твэлов, отработавших в судовых а.з., реакторных петлях и электрообогреваемых экспериментальных стендах из различных материалов, при разных параметрах и ВХР можно сделать следующие выводы:

- максимальная толщина нодульной коррозии имеет место в области пристенного кипения в газонасыщенном теплоносителе, максимально недогретом до температуры кипения, и экспоненциально снижается к верхней части по мере уменьшения недогрева и увеличения паросодержания;
- на торцах твэлов (80-100 мм), где тепловыделения минимальны, нодульная коррозия отсутствует, есть только незначительная равномерная оксидная пленка;
- по периметру твэлов наблюдаются продольные полосы коррозионных повреждений в местах, максимально приближенных к окружающим их соседним твэлам, где может иметь место локальное повышение температуры по всей высоте.
- характер распределения коррозионных повреждений на оболочках твэлов, полученных при различных ВХР и для разных материалов, при наличии и отсутствии радиационных воздействий хорошо коррелируется с дислокацией и интенсивностью пристенного кипения газонасыщенного теплоносителя, что достаточно убедительно подтверждает их взаимосвязь. Распределение окислов качественно совпадает со степенью недогрева воды при пристенном кипении и концентрацией газов в парогазовых пузырьках на оболочках твэлов. Аналогичного влияния других факторов на интенсивность коррозии и характер ее распределения не наблюдается;
- интенсивность наводороживания циркониевых оболочек твэлов коррелируется с интенсивностью коррозии.

Характер распределения коррозии на чехлах ТВС

В отличие от твэлов нодульная коррозия на чехлах меньше. Максимальная коррозия и содержание гидридов наблюдаются в верхней части на высоте около 600 мм, выше – снижается. Нодульная коррозия в нижней части чехлов практически отсутствует. Внутренние поверхности имеют более значительную коррозию. На некоторых чехлах на внутренней поверхности наблюдаются продольные полосы коррозионных повреждений по всей длине

в местах, прилежащих к твэлам пучка. Некоторые чехлы на наружной поверхности также имеют скопления нодулей в виде шести продольных полос в местах расположения окружающих их ТВС (рис. 7). Максимальное содержание водорода находится в местах максимального скопления нодулей. Такой характер дислокации коррозионных повреждений на чехлах ТВС также коррелируется с наличием и интенсивностью пристенного «газового» кипения (рис. 8).

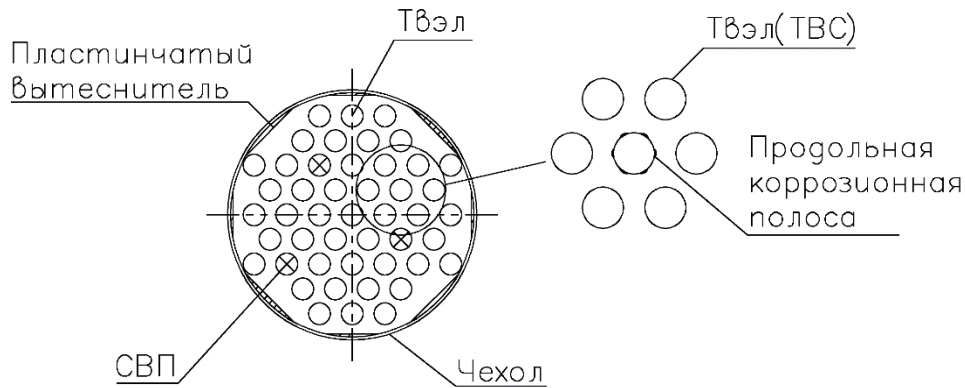
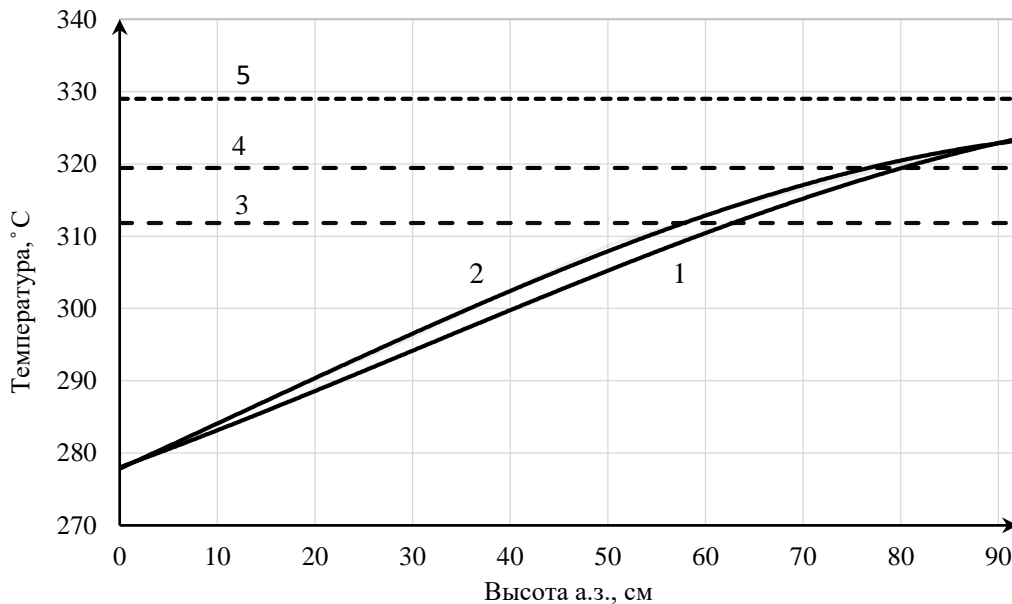


Рис. 7. Взаимное расположение твэлов (ТВС) и коррозионных полос на их поверхностях



**Рис. 8. 1 – Изменение температуры теплоносителя;
2 – Изменение температуры чехлов ТВС;
3 – Температура начала газовыделения при температуре воды в КД 20 °С;
4 – Температура начала газовыделения при температуре воды в КД 50 °С;
5 – Температура насыщения теплоносителя при данном давлении**

Заключение

1. Анализ результатов исследований элементов активных зон, отработавших в судовых и исследовательских реакторах, электрообогреваемых стендах, показывает, что одной из очевидных причин ограничения их ресурса является коррозионное повреждение оболочек, работающих с пристенным кипением, в том числе «газовым», в газонасыщенном теплоносителе, существенно недогретом до температуры кипения.
2. При проектировании перспективных активных зон для РУ с газовой системой компенсации, необходимо:
 - учитывать газоперенос в оборудовании первого контура, влияющий на гидродинамику, тепловые и коррозионные процессы на оболочках элементов а.з.;
 - снижать тепловые нагрузки на элементы а.з. путем увеличения объема активной зоны, увеличения удельного расхода теплоносителя (снижения температурного перепада в а.з.);
 - исключать пристенное кипение, в том числе «газовое».

Библиографический список

1. **Полуничев, В.И.** Некоторые направления повышения коррозионной стойкости элементов активных зон из сплавов циркония реакторных установок судов и плавучих атомных станций / В.И. Полуничев, Д.А. Голубева // Межотраслевой семинар для молодых специалистов «50 лет атомному ледокольному флоту России. Опыт создания, эксплуатации и перспективы развития». – ДОЛ «Искра», 2009. (Разрешение на информационный обмен № 39/14 – 84/2009 от 21 августа 2009 года).
2. Атомная техника за рубежом. – 1986. – № 9. – С. 30-35.
3. **Колобнева, Л.И.** Структурное состояние и фазовый состав алюминиевых сплавов как основные факторы, определяющие их коррозионную стойкость в водной среде / Л.И. Колобнева // Материалы ядерной техники: труды. – М.: ВНИИНМ, 2005. – С.138-145.
4. **Ватулин, А.В.** Результаты разработок по созданию перспективных твэлов для исследовательских реакторов / А.В. Ватулин, Ю.А. Стецкий, Л.И. Колобнева, Ю.И. Петров, Ю.И. Трифонов [и др.]. // Реакторное материаловедение: сборник докладов. Т. 2, Ч. 2, 2004. – С. 3-24.
5. **Бараненко, В.И.** Термодинамика и теплообмен в ЯЭУ с газонасыщенным теплоносителем / В.И. Бараненко, В.Г. Асмолов, В.С. Киров. – М.: Энергоатомиздат. 1993. – С. 124-221.
6. **Федуленко, В.М.** К истории энергетического реактора РБМК и о «газовом кризисе теплоотдачи» / В.М. Федуленко // Препринт № 6714/3. – М.: ИАЭ, 2012.
7. **Зверев, Д.Л.** Результаты разработки технического проекта реакторной установки для универсального атомного ледокола // Судостроение / Д.Л. Зверев, К.Б. Вешняков, Ю.К. Панов, В.И. Полуничев. – 2011. – № 3. – С. 32-37.

*Дата поступления
в редакцию: 24.10. 2019*

V.I. Polunichev, A.F. Filimonov

**POSSIBLE WAYS TO INCREASE THE LIFESPAN OF CORES
WITH FA Zr-COMPONENTS FOR ADVANCED RPS OF SHIPS AND SNPPS**

Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Purpose: To discuss possible reasons for formation of nodular corrosion of core Zr-components as well as suggestions aimed at changing the core operation conditions and their lifespan. One of the recent trends in advanced RPs and SNPP development is long-term performance enhancement and core cost reduction. The present performance does not fully meet the existing requirements for advanced RPs and SNPPs. Considerable increase of the lifespan is limited due to the condition of fuel cladding and other Zr-alloy components, susceptible to nodular corrosion. Search of the reasons for nodular corrosion has been undertaken for several decades. Various factors have been analyzed: neutronics, thermal engineering, but no unambiguous answer was found. The main message of this paper is analyze one of the versions of nodular corrosion progress.

Methodology: Review and analysis of the corrosion state for core components operated at installations and facilities under various thermal and hydraulic parameters. Analysis of possible impacts provoking the corrosion damage of components.

Results: The performed analysis has shown that one of the most probable reasons of the nodular corrosion limiting the Zr-core lifespan is the wall-adjacent boiling on components including the «gaseous» one in the gas-saturated coolant which is essentially subcooled. The impact of the above mentioned operating conditions on the nodular corrosion initiation with various types of structural materials used under various water-chemistry conditions and thermal-engineering parameters with or without irradiation causes a certain pattern of their interaction.

Conclusions: Suggestions have been made to change parameters which should be taken into account during designing of the advanced cores for RPs with gas pressurizer system: reduce thermal loads on core elements, eliminate near-wall boiling, including «gaseous» one, replace whenever possible gas pressurizer system with steam pressurizer.

Key words: marine reactor plant core, fuel assembly with Zr-alloy components, gas-saturated coolant, nodular corrosion, lifespan.