
**ВОДОПОДГОТОВКА
И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ I КОНТУРА
ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ВВЭР-СКД**© 2025 г. Н. Л. Харитонова^а, *, В. Ф. Тяпков^а, **^аНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское шоссе, д. 31, Москва, 115409 Россия

*e-mail: NLKharitonova@mephi.ru

**e-mail: vladimirtyapkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.01.2025 г.

После доработки 10.02.2025 г.

Принята к публикации 05.03.2025 г.

Рассмотрены вопросы применения высокотемпературной механической фильтрации теплоносителя для обеспечения водно-химического режима (ВХР) I контура водо-водяного энергетического реактора сверхкритического давления (ВВЭР-СКД). Представлен критический анализ использования высокотемпературных фильтров (ВТФ) на двухконтурной ядерной энергетической установке (ЯЭУ) ВВЭР-СКД. Отмечены главные сложности реализации технологии высокотемпературной фильтрации при рабочих параметрах I контура, разработанной и внедренной в проекте унифицированной реакторной установки ВВЭР-1000. Рассмотрены особенности функционирования ВТФ в области сверхкритических параметров. Проанализированы причины изменения поведения продуктов коррозии при переходе в область околоскритических и сверхкритических параметров. Оценены расчетные и экспериментальные значения растворимости продуктов коррозии в водном теплоносителе в области околоскритических и сверхкритических параметров. Продемонстрировано, что при переходе в область околоскритических и сверхкритических параметров степень пересыщения теплоносителя по отношению к железу и никелю увеличивается, что способствует дальнейшему доминированию в нем доли взвешенных частиц по сравнению с соединениями, находящимися в истинно растворенном состоянии. Выполнен анализ влияния перехода параметров в околоскритическую и сверхкритическую области на характеристики взвешенных частиц продуктов коррозии в теплоносителе и эффективность работы ВТФ. Выдвинуто предположение, что в воде сверхкритических параметров эффекты, вызванные радиолизом, способствуют повышению роли коллоидных систем, образовавшихся из продуктов коррозии. Показано, что если использовать системы высокотемпературной механической фильтрации теплоносителя на энергоблоках с ВВЭР-СКД, то можно ожидать, что проблемы, отмеченные при их эксплуатации на серийных энергоблоках с ВВЭР-1000, усугубятся. Предложены возможные пути совершенствования технологии высокотемпературной фильтрации в I контуре ЯЭУ с ВВЭР-СКД.

Ключевые слова: ВВЭР-СКД, водный теплоноситель, водно-химический режим, высокотемпературный механический фильтр, продукты коррозии, растворимость, коллоидные частицы

DOI: 10.56304/S0040363625600119

В число основных направлений развития технологии проекта ВВЭР-СКД наряду с созданием новых конструкционных материалов входит разработка ВХР [1, 2]. Проблемы, которые могут возникнуть и которые потребуются решить при разработке и обосновании водно-химического режима для обеспечения коррозионной стойкости конструкционных материалов активной зоны и контура циркуляции теплоносителя ВВЭР-СКД, рассмотрены в [3]. Вопросы использования систем высокотемпературной механической фильтрации (обезжелезивания) применительно к

одноконтурному прямоточному ВВЭР-СКД обсуждаются в [4]. В настоящей статье выполнен критический анализ эффективности работы систем высокотемпературной фильтрации теплоносителя в двухконтурной двухпетлевой ядерной энергетической установке с ВВЭР-СКД, основной предпосылкой для разработки которой является опыт эксплуатации классических энергоблоков с ВВЭР и энергоблоков сверхкритических параметров тепловой энергетики. Это соответствует планам перспективного развития технологии ВВЭР в России, а также согласуется с главными направ-

лениями дальнейших работ с учетом сотрудничества с Международным форумом реакторных технологий поколения IV (Generation IV International Forum) для сверхкритических реакторов с водяным охлаждением [1].

С начала 1970-х годов при разработке систем поддержания требуемого качества теплоносителя I контура реакторов ВВЭР/PWR рассматривалась возможность высокотемпературной очистки теплоносителя с целью снизить накопление продуктов коррозии (в том числе и активированных) на теплопередающих поверхностях. По этой причине в 1970-х годах было проведено большое количество исследований по технологии высокотемпературной фильтрации. Исследования высокотемпературной очистки были сосредоточены главным образом на проверке эффективности фильтров для удаления из контура продуктов коррозии. Испытания прототипов фильтров в стендовых условиях показали возможность достичь степени фильтрации (по взвешенным примесям) более 80% [5, 6].

Промышленное внедрение очистки теплоносителя с использованием высокотемпературных механических фильтров в системе байпасной очистки теплоносителя I контура (СВО-1 — спецводоочистка) было впервые осуществлено в 1984 г. на энергоблоке № 1 Запорожской АЭС, где применялся ВТФ с фильтрующей загрузкой из губчатого титана (насыпная плотность 1.4 г/см³, средний размер зерен 1.3 мм). Наибольшие проблемы возникли при переносе результатов экспериментов на полноразмерные высокотемпературные механические фильтры, установленные непосредственно в I контуре действующих энергоблоков [7–12].

В серийных энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000 проекта В-320, а также АЭС “Куданкулам” (ВВЭР-1000 проекта В-412) и АЭС “Бушер” (ВВЭР-1000 проекта В-446) используются высокотемпературные титановые фильтры. Главной целью применения ВТФ на начальном этапе являлось снижение воздействия ионизирующего излучения на персонал в период проведения ремонтных работ благодаря уменьшению загрязненности поверхностей оборудования контура активированными продуктами коррозии. Предполагалось, что использование очистки теплоносителя на ВТФ будет способствовать:

эффективному выведению из теплоносителя I контура радионуклидов коррозионного происхождения, прежде всего сравнительно долгоживущего ⁶⁰Со ($T_{1/2} \approx 5.3$ года);

снижению дозовых нагрузок на персонал в период планово-предупредительных ремонтов.

В процессе эксплуатации фильтров (особенно в первые годы) эти преимущества действительно были отмечены, но были выявлены и серьезные проблемы [7, 9, 11]. Было зафиксировано, что си-

стемы высокотемпературной механической фильтрации, установленные на I контуре энергоблоков с ВВЭР-1000, работают недостаточно эффективно и не влияют определяющим образом на уровень излучения от оборудования. В настоящее время нет убедительных данных, подтверждающих или опровергающих эффективность и безопасность применения ВТФ [5–12]. Как следствие, несмотря на привлекательность этой технологии, на энергоблоках атомных электростанций проекта ВВЭР-1200/ВВЭР-ТОИ (Нововоронежская АЭС-2, Ленинградская АЭС-2, Курская АЭС-2, Смоленская АЭС-2, АЭС Белоруссии, Египта, Бангладеш и Венгрии) высокотемпературные титановые фильтры проектом не предусмотрены.

В данной статье для оценки возможности и безопасности использования систем высокотемпературной фильтрации теплоносителя на энергоблоках с ВВЭР-СКД выполнено следующее:

проведен анализ положительных и проблемных моментов при эксплуатации систем очистки теплоносителя с ВТФ (СВО-1) на серийных энергоблоках ВВЭР-1000;

рассмотрены особенности функционирования ВТФ в области сверхкритических параметров. Для этого проанализировано поведение продуктов коррозии при переходе в область околоскритических и сверхкритических параметров — оценены растворимости продуктов коррозии (Fe, Ni и Co) в воде околоскритических и сверхкритических параметров и рассмотрена роль коллоидных частиц продуктов коррозии и сохранения их стабильности при сверхкритических параметрах в образовании поверхностных отложений.

При этом отмечена важность учета коллоидной фазы в теплоносителе для оценки поведения радионуклидов коррозионного происхождения в области околоскритических и сверхкритических параметров, а также сформулированы возможные пути совершенствования технологии высокотемпературной механической фильтрации.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

В данном разделе рассматриваются проектные характеристики системы байпасной очистки теплоносителя I контура, пути совершенствования технологии высокотемпературной фильтрации, опыт эксплуатации систем очистки теплоносителя в высокотемпературных механических фильтрах на энергоблоках с ВВЭР-1000.

*Проектные характеристики
системы очистки теплоносителя
с использованием высокотемпературных
механических фильтров
на энергоблоках с ВВЭР-1000*

Система байпасной очистки теплоносителя I контура с использованием ВТФ является средством обеспечения соблюдения норм качества теплоносителя. Главное назначение системы — непрерывная очистка теплоносителя I контура от дисперсных продуктов коррозии конструкционных материалов с целью снизить возможность отложений их на поверхностях оборудования и уменьшить радиационное воздействие на обслуживающий персонал. Основным элементом системы является высокотемпературный механический фильтр, установленный в каждой петле контура. Далее приведены проектные характеристики ВТФ энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 [5, 7–9]:

Производительность, м ³ /ч.....	100
Давление рабочее, МПа.....	15.7
Температура рабочая, °С.....	290
Диаметр, мм.....	1000
Скорость фильтрации, м/ч.....	150
Загрузка.....	Титановый порошок
Высота слоя сорбента, мм.....	850
Гранулометрический состав, мм.....	0.63–1.00
Коэффициент очистки, %.....	80

На рис. 1 показана технологическая схема байпасной очистки теплоносителя I контура [7–12]. Согласно проекту очищаемый теплоноситель отбирается из напорной линии главного циркуляционного насоса (ГЦН), поступает на высокотемпературный фильтр и фильтр-ловушку, установленные на байпасе каждого ГЦН, и после очистки на ВТФ возвращается во всасывающую линию ГЦН.

Высокотемпературный механический фильтр предназначен для очистки теплоносителя от дисперсных продуктов коррозии конструкционных материалов I контура. Для предотвращения выноса сорбента в контур циркуляции теплоносителя в случае аварийного разрушения дренажной системы ВТФ в проекте предусмотрен фильтр-ловушка. Номинальный расход теплоносителя через высокотемпературные механические фильтры при проектных параметрах I контура в соответствии с проектом энергоблоков унифицированных АЭС с ВВЭР-1000 составляет $4 \times 100 \text{ м}^3/\text{ч} = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$. Циркуляция через каждую цепочку системы высокотемпературной очистки теплоносителя обеспечивается за счет напора, создаваемого ГЦН. Оборудование и элементы системы расположены в гермозоне и рассчитаны на критические значения параметров, которые могут возникнуть в

ней при авариях с разуплотнением трубопроводов I контура.

Система высокотемпературной очистки теплоносителя на энергоблоках с ВВЭР-1000 состоит из подсистем основного потока, вспомогательно-го оборудования и трубопроводов. В подсистему основного потока входят четыре независимые технологические группы, каждая из которых включает в себя высокотемпературный механический фильтр, фильтр-ловушку, трубопроводы и арматуру. Для восстановления эксплуатационных свойств высокотемпературного сорбента (губчатого титана марок ГТ, ПТХ) проектом предусмотрены взрыхляющая отмывка водой или водой с подачей сжатого воздуха, гидровыгрузка в фильтр-регенератор и химическая регенерация в корпусе последнего [5, 7, 9, 11]. Для выгрузки сорбента из высокотемпературного фильтра в фильтр-контейнер предусмотрено специальное устройство. Оборудование системы высокотемпературной очистки теплоносителя располагается в герметичной части реакторного отделения (внутри защитной оболочки).

*Опыт эксплуатации систем очистки
теплоносителя с использованием
высокотемпературных механических фильтров
на энергоблоках с ВВЭР-1000*

В процессе эксплуатации систем высокотемпературной фильтрации на действующих энергоблоках с ВВЭР-1000 были выявлены следующие проблемы [7, 9, 11]:

эффективность работы высокотемпературных фильтров в процессе эксплуатации снижается и их влияние на радиационную обстановку заметно сказывается только в начальный период эксплуатации энергоблоков;

байпасная очистка теплоносителя от продуктов коррозии железа малопродуктивна, так как ее эффективность зависит не столько от коэффициента очистки, сколько от расхода теплоносителя через фильтр по сравнению с расходом в I контуре;

штатная технология водной промывки высокотемпературного фильтра не обеспечивает эффективного удаления продуктов коррозии из фильтрующего материала;

химическая регенерация сорбента в фильтре-регенераторе затруднена вследствие несовершенной конструкции фильтра и технологии гидроперегрузки, а также проектных недоработок;

высокотемпературный сорбент (губчатый титан) со временем теряет свои эксплуатационные свойства и требует замены. Однако штатная проектная технологическая схема не позволяет этого сделать.

Формирование поверхностных отложений и накопление в них активности происходят из объема циркулирующего теплоносителя, соответ-

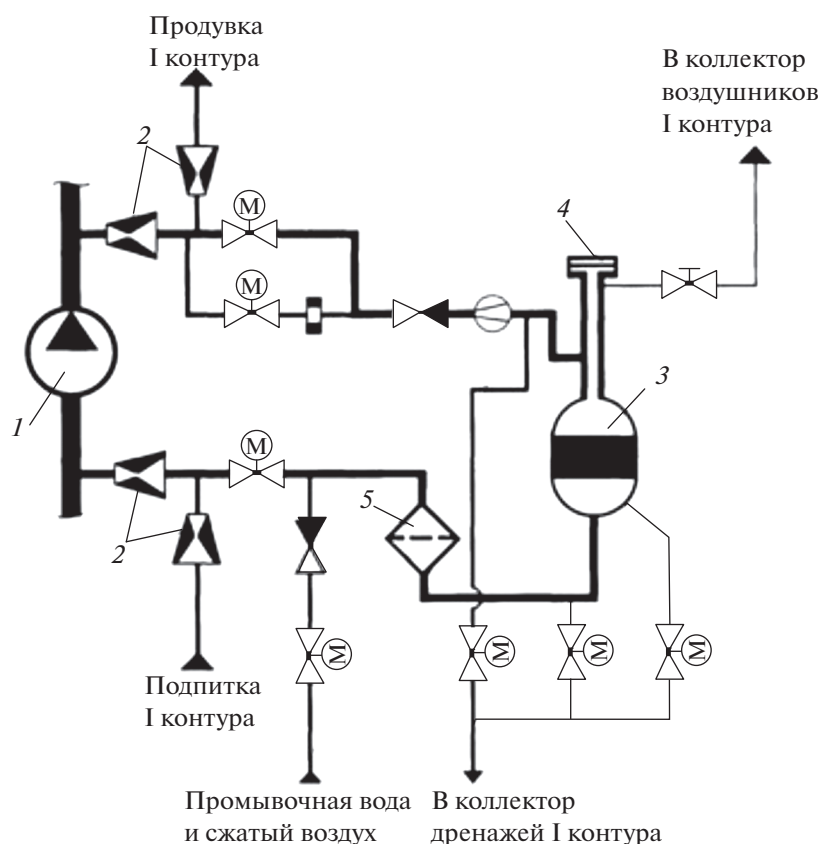


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема байпасной очистки теплоносителя I контура системы высокотемпературной фильтрации серийного энергоблока с ВВЭР-1000 [5].

1 – главный циркуляционный насос; 2 – ограничитель течи; 3 – высокотемпературный механический фильтр; 4 – трубопровод гидровыгрузки фильтрующего материала; 5 – фильтр-ловушка

ственно интенсивность этих процессов зависит от концентрации в нем как стабильных, так и активированных продуктов коррозии. Данные, получаемые на АЭС с ВТФ, по динамике накопления радиоактивности в отложениях и мощности доз от оборудования контура практически не отличаются от аналогичных данных для реакторов без ВТФ. Предположение о том, что снижение доли дисперсной составляющей продуктов коррозии в теплоносителе за счет работы ВТФ в СВО-1 приведет к соответствующему уменьшению коррозионной активности в отложениях оборудования контура, не подтвердилось в полной мере. После 10–15 лет эксплуатации энергоблока фильтры могут накапливать продукты коррозии, в том числе радионуклиды. В некоторых случаях концентрация веществ на выходе из высокотемпературного фильтра может быть даже выше, чем на его входе [7, 9, 11].

В процессе эксплуатации СВО-1 ни на одном из действующих энергоблоков с ВВЭР-1000 (с 1984 г.) выносная гидроперегрузка сорбента из высокотемпературного фильтра в фильтр-контейнер, предусмотренная проектом и необходимая для проведения внутреннего осмотра фильтра, не была выполнена успешно. Поэтому начиная с

2003 г. в период планово-предупредительных ремонтов проводятся взрыхляющие отмывки сорбента [9–11]. При эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 с ВТФ были выявлены следующие проблемы:

отсутствие отработанной технологии гидровыгрузки губчатого титана, обладающего высокой удельной массой;

спекание титана под воздействием высоких температур, делающее практически невозможным проведение взрыхляющей отмывки сорбента.

Возможные пути совершенствования технологии высокотемпературной фильтрации

Высокотемпературный сорбент (губчатый титан) в первые годы эксплуатации энергоблока, как указывалось ранее, сохраняет исходные свойства и выполняет свое функциональное назначение. Однако с течением времени поры и промежутки между зернами сорбента забиваются продуктами коррозии. В дальнейшем происходит образование внутренней структуры отложений и, как следствие, увеличение их механической прочности и сил сцепления с зернами сорбента. Для замедления негативных процессов, связанных с потерей

сорбентом эксплуатационных свойств, предусмотрены взрыхляющие промывки фильтрующей загрузки СВО-1. Оценка штатной взрыхляющей промывки показала ее низкую эффективность. Вынос механических частиц загрязнений происходит только с верхнего слоя фильтрующей загрузки общей глубиной до 100 мм [9, 11, 12]. Сорбент остается практически неподвижным, о чем свидетельствуют значительное гидравлическое сопротивление загрузки, что подтверждается низким расходом промывочной воды, и отсутствие перемешивания поверхностных и нижележащих слоев загрузки фильтра [11].

Гидродинамические параметры сорбента могут отличаться от заявленных паспортных характеристик, а технические средства, предусмотренные проектной схемой, не позволяют выполнить качественное взрыхление фильтрующего слоя даже “свежего” сорбента. Гидровыгрузка сорбента, предназначенная для выносной регенерации сорбента штатными дезактивационными растворами, по указанным ранее причинам трудно осуществима и требует принятия кардинальных мер по доработке технологической схемы. Для совершенствования технологии высокотемпературной фильтрации и повышения эффективности высокотемпературных фильтров предложено [5–11]:

оптимизировать расход теплоносителя через высокотемпературные фильтры (обеспечить расход через СВО-1 от 500 до 1000 м³/ч) [9, 10];

поддерживать необходимое качество фильтрующей загрузки путем регулярного проведения отмывок, взрыхления и химических промывок (дезактиваций) сорбента [9, 11];

оптимизировать ВХР I контура (поддерживать постоянное оптимальное значение рН_г теплоносителя в течение кампании) [7];

использовать процедуру внутрикорпусной регенерации сорбента для восстановления его эксплуатационных свойств [5, 11] или реализовать технологию “дезактивации на ходу” [12].

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ В ОБЛАСТЬ ОКОЛОКРИТИЧЕСКИХ И СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

При оценке возможности использовать высокотемпературную фильтрацию на инновационных энергоблоках с ВВЭР-СКД наряду с анализом опыта эксплуатации ВТФ на действующих энергоблоках важно оценить влияние сверхкритических параметров на поведение продуктов коррозии.

Область окологкритических и сверхкритических параметров состояния (температура 647.096 К, давление 22.064 МПа) характеризуется резким приращением энтальпии теплоносителя вблизи

температуры, отвечающей максимальному значению теплоемкости, при которой свойства воды как растворителя резко изменяются и оказывают сильное влияние на сольватацию [13–15]. Специфика поведения продуктов коррозии в контуре циркуляции теплоносителя и удержания их в ВТФ при переходе на сверхкритические температуры и давления часто рассматривается с позиций равновесной термодинамики [13–15]. При этом традиционный термодинамический подход базируется на оценке растворимости продуктов коррозии.

В то же время, согласно опубликованным экспериментальным данным, возникает возможность образования коллоидных частиц продуктов коррозии и сохранения их стабильного состояния в условиях I контура. В этом случае перенос продуктов коррозии в контуре циркуляции теплоносителя и их проскок через ВТФ возможен при значительно более высоких концентрациях, чем следует из традиционного подхода, основанного на оценке растворимости методами равновесной термодинамики. Вследствие резких изменений растворимости продуктов коррозии при переходе через критическую область при воздействии ионизирующего излучения возможно образование коллоидных частиц, которые могут быть термодинамически нестабильными [16, 17].

Изменение растворимости

Поведение оксидов металлов, используемых в сплавах, которые предлагаются в концепт-проектах ВВЭР-СКД (в первую очередь, Fe, Ni и Cr), во многом диктуется характером изменения их растворимости в зависимости от параметров состояния теплоносителя (температуры, давления). Уровни мощности дозы гамма-излучения от облучения на российских энергоблоках с ВВЭР определяются главным образом радионуклидами ⁵⁸Co и ⁶⁰Co. Объемная активность радионуклидов ⁵¹Cr, ⁵⁴Mn, ⁵⁹Fe, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn, ⁹⁵Zr и ⁹⁵Nb, установленная по результатам анализа проб теплоносителя в I контуре при работе энергоблоков с ВВЭР-1000 на энергетических уровнях мощности, свидетельствует о довольно низкой концентрации продуктов коррозии, в первую очередь долгоживущего кобальта ⁶⁰Co [10–12]. В [18, 19] на основании экспериментальных данных по растворимости соединений кобальта выдвинуто предположение, что массоперенос кобальта в контуре возможен либо в составе смешанных шпинелей, либо при сорбции на продуктах коррозии железа. Кобальт присутствует в теплоносителе не в форме свободных гидратированных частиц типа Co²⁺, CoOH⁺, Co(OH)₂ · H₂O и пр., а в составе смешанных шпинелей наряду с железом, концентрация которого в сотни раз выше. Поэтому кобальт, по-видимому, не может переноситься по контуру в виде микрочастиц

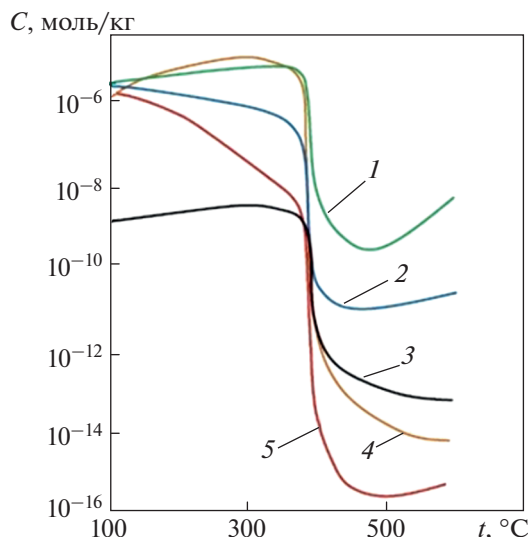


Рис. 2. Расчетная зависимость растворимости оксидов в нейтральной воде от температуры t при давлении 25 МПа [20–22].

1 – Cr_2O_3 ; 2 – Fe_3O_4 ; 3 – TiO_2 ; 4 – Al_2O_3 ; 5 – NiO

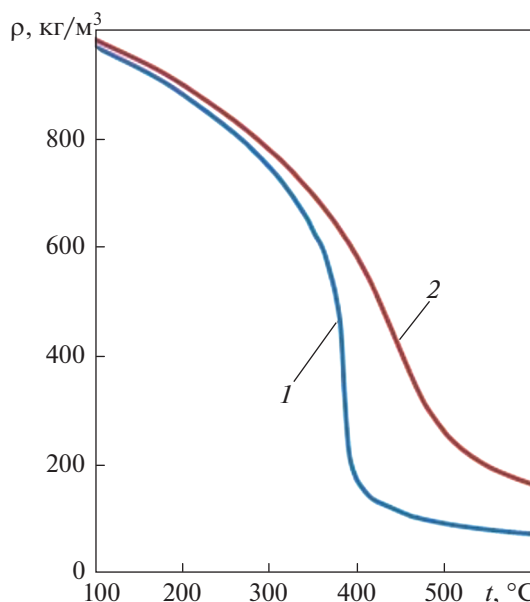


Рис. 3. Зависимость плотности H_2O ρ от температуры при давлении 25 (1) и 50 (2) МПа [23]

твёрдой фазы (взвесей), образовавшихся в результате дегидратации согласно реакции $\text{Co}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CoO}_n + (n-1)\text{H}_2\text{O}$. Это, в свою очередь, означает, что поведение кобальта в теплоносителе определяется в значительной мере поведением продуктов коррозии железа, которые являются своеобразными “переносчиками” кобальта. Данные [18, 19] подтверждают роль оксидов железа как основных “носителей” радиоактивности, приводящих к росту дозы облучения в результате их массопереноса.

Экспериментальные данные по растворимости продуктов коррозии (в первую очередь, оксидов Fe, Ni, Cr) в водно-паровых растворах при сверхкритических параметрах весьма ограничены вследствие чрезвычайно низких концентраций и экспериментальных проблем определения растворимости при высоких температурах и давлениях. Наиболее перспективным представляется подход, включающий в себя теоретические расчеты, химические модели и экспериментальные исследования.

Расчетные зависимости растворимости (концентрации) оксидов металлов C , используемых в сплавах, которые предлагаются в концепт-проектах ВВЭР-СКД (Fe, Ni, Cr), в нейтральной воде при температуре до 600°C и давлении 25 МПа показаны на рис. 2 [20–22].

Уменьшение плотности H_2O с ростом температуры в околокритической области (рис. 3) [23] приводит к резкому снижению свойств H_2O как ионизирующего агента и стягиванию растворенных ионов в нейтральные частицы — ионные пары и молекулы. Этот процесс сопровождается ра-

дикальными изменениями условий гидратации и резким падением растворимости [20–22]. Значительное снижение растворимости оксидов металлов наблюдается при переходе в сверхкритическую область низкой плотности ($<322 \text{ кг/м}^3$) как результат уменьшения плотности и диэлектрической проницаемости H_2O при сверхкритических параметрах [23].

Значения растворимости рассчитаны в [20–22] по модифицированному уравнению состояния Хельгесона — Киркхэма — Флауэрсса [24]. Результаты экспериментов, использованные для валидации этого уравнения состояния, получены при плотности более 350 кг/м^3 (температура не выше 385°C , давление 25 МПа), что не позволяет провести надежную экстраполяцию при более низкой плотности. Можно говорить о качественной оценке значений растворимости продуктов коррозии, вычисленных в [20–22] при сверхкритических параметрах, соответствующих плотностям H_2O ниже 350 кг/м^3 .

Изменение растворимости магнетита в области околокритических и сверхкритических параметров

Магнетит (Fe_3O_4) является основной формой существования продуктов коррозии, присутствующих в виде взвешенных частиц в теплоносителе и коррозионных отложениях на теплопередающих поверхностях ВВЭР. Растворение магнетита характеризуется окислительно-восстановительными и гидролизными реакциями, ход которых зависит от pH и концентраций окислителя и вос-

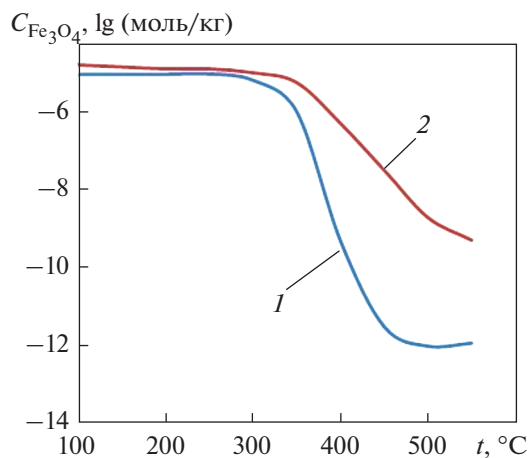


Рис. 4. Зависимость растворимости магнетита $C_{Fe_3O_4}$ в чистой воде от температуры при давлении 25 (1) и 50 (2) МПа [14, 15]

становителя. По оценкам [13, 25, 26], при повышении температуры от 370 до 400 °С и давлении 25 МПа расчетное значение растворимости магнетита резко снижается на пять-шесть порядков и составляет от 10^{-11} до 10^{-10} моль/кг (см. рис. 2), что соответствует характеру снижения плотности H_2O в этом температурном диапазоне. Повышение давления способствует сглаживанию температурной зависимости кривой растворимости Fe_3O_4 , при этом повторяется характер зависимости плотности H_2O от температуры для давлений 25 и 50 МПа (рис. 4) [23]. С ростом давления температурная кривая растворимости Fe_3O_4 стано-

вится более пологой, и при давлении 50 МПа растворимость уменьшается на два-три порядка, в отличие от пяти-шести порядков снижения при давлении 25 МПа (см. рис. 3). Повышение давления, приводящее к менее резкому падению растворимости, способствует снижению степени пересыщения теплоносителя по железу.

Обобщенные результаты экспериментальных исследований растворимости магнетита при повышенных температурах в восстановительной водной среде, содержащей растворенный водород [13, 25–28], а также в окислительной среде [29] приведены на рис. 5. В восстановительной среде растворимость Fe_3O_4 выше (практически на порядок), чем в окислительной среде, при тех же параметрах. Растворимость магнетита возрастает по мере увеличения равновесной концентрации растворенного водорода при прочих равных условиях. С повышением температуры растворимость магнетита падает, причем тем интенсивнее, чем выше равновесная концентрация растворенного водорода C_{H_2} (рис. 6) [30].

Результаты экспериментального определения растворимости магнетита в воде в зависимости от температуры в диапазоне от 250 до 550 °С при давлении 25 МПа [13, 25–28] показывают, что, хотя характер полученных зависимостей идентичен расчетным, численные значения расчетной растворимости магнетита при около- и сверхкритических температурах (см. рис. 2, 3) [19, 20] лежат на несколько порядков ниже экспериментальных значений (см. рис. 5) [13, 24–29]. Такое расхождение может являться следствием неопределенно-

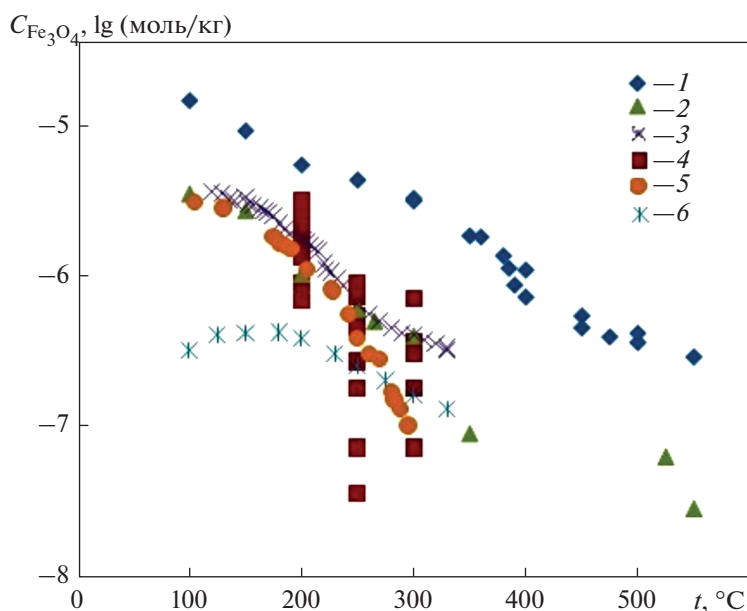


Рис. 5. Зависимость растворимости магнетита от температуры при различных окислительно-восстановительных условиях (эксперимент).

1 – [13], 25 МПа; 2 – [25] (насыщение водородом); 3 – [26]; 4 – [27]; 5 – [28]; 6 – [29], $C_{O_2} = 20$ мкг/кг

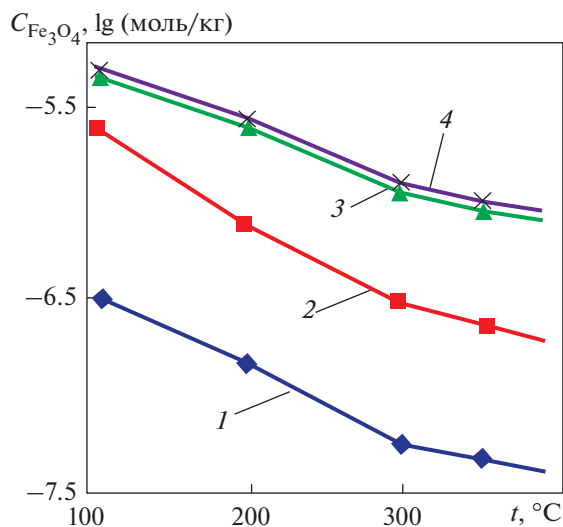


Рис. 6. Зависимость растворимости магнетита в нейтральной воде от температуры (расчетная оценка [30]).

C_{H_2} , мкг/кг: 1 – 0.2; 2 – 20; 3 – 1060; 4 – 1560

стей экспериментальных методов (обеспечение представительности пробы) и/или пределом точности аналитической методики определения концентрации железа в воде.

Согласно экспериментам растворимость магнетита в восстановительной среде в зависимости от концентрации водорода при температуре $25^{\circ}C$ составляет 160–190 мкг/кг, при $300^{\circ}C$ – от 5 до 40 мкг/кг. В условиях сверхкритических параметров, по результатам экспериментов [13, 25–28], при температуре $550^{\circ}C$ и давлении 25 МПа растворимость равна 2–5 мкг/кг. Приведенные данные свидетельствуют о следующем:

теплоноситель I контура при низких температурах недонасыщен по отношению к железу (растворимость при избытке водорода выше регламентируемого значения);

при температурах, характерных для работы ВТФ при эксплуатации энергоблоков с ВВЭР-1000 на мощности (не более $330^{\circ}C$), концентрация соединений железа в теплоносителе может быть меньше или больше растворимости для данных условий (в зависимости от концентрации водорода – от 5 до 40 мкг/кг) и не должна превышать регламентируемого отраслевыми стандартами значения, равного 50 мкг/дм³ [31]. Этот результат хорошо согласуется с выводом работы [7], в которой предполагается возможность растворения дисперсных частиц, поглощенных в ВТФ, что снижает эффективность его работы. Аналогичные результаты получены в [8], где показано, что для энергоблоков с ВВЭР-1000 при низких содержаниях продуктов коррозии в теплоносителе, когда они находятся в истинно растворенной или коллоидной форме, удаление их на ВТФ не происходит;

при переходе в область околокритических и сверхкритических параметров вследствие резкого снижения растворимости Fe_3O_4 теплоноситель пересыщен по отношению к железу и степень пересыщения увеличивается по сравнению с таковой на энергоблоках, работающих при докритических параметрах.

Изменение растворимости оксида никеля

Растворимость оксида никеля (NiO) минимальна по сравнению с растворимостью оксидов металлов, используемых в сплавах, которые предлагаются для использования в проекте ВВЭР-СКД (см. рис. 2). По расчетным оценкам [20–22] растворимость NiO при температуре более $350^{\circ}C$ составляет примерно 0.05 мкг/кг, а по данным [14, 15] концентрация никеля в теплоносителе при эксплуатации энергоблоков с PWR на мощности составляет около 0.5 мкг/кг, т.е. превышает растворимость NiO практически на порядок. Доля взвешенных частиц доминирует по сравнению с соединениями никеля, находящимися в истинно растворенном состоянии [14–16].

Таким образом, с позиций равновесной термодинамики при переходе в область околокритических и сверхкритических параметров вследствие резкого снижения растворимости соединений железа и никеля в водной среде степень пересыщения теплоносителя по отношению к железу и никелю увеличивается, способствуя доминированию доли взвешенных частиц по сравнению с соединениями, находящимися в истинно растворенном состоянии.

РОЛЬ КОЛЛОИДОВ ПРИ ПЕРЕХОДЕ В ОБЛАСТЬ ОКОЛОКРИТИЧЕСКИХ И СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Закономерности фильтрации продуктов коррозии на ВТФ зависят от химического состава и их спектра дисперсности в I контуре при конкретных параметрах. В теплоносителе сверхкритических параметров эффекты, вызванные радиолизом, могут приводить к образованию коллоидных систем из продуктов коррозии, находящихся в ионной форме. Дальнейшее поведение таких взвешенных соединений железа зависит от температуры, давления и условий облучения. При переходе через критическую область вследствие резких изменений растворимости продуктов коррозии возможно образование коллоидных частиц, которые могут быть термодинамически нестабильными [16, 17, 32, 33]. В последнее десятилетие при изучении коллоидов происходило развитие и совершенствование методов их разделения и анализа: ультрафильтрации, проточного фракционирования в поперечном силовом поле, электронной и атомно-силовой микроскопии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной

плазмой, методов светорассеяния, рентгеновской спектроскопии и др. [16, 17, 33].

Международный союз теоретической и прикладной химии (IUPAC) определяет коллоиды (коллоидные системы) как особое состояние веществ, которые по степени дисперсности располагаются между истинными растворами и грубо-дисперсными системами [34]. Условные границы размеров частиц коллоидов согласно [34] лежат в области от 1 нм (10^{-9} м) до 1 мкм (10^{-6} м). Самые мелкие коллоидные частицы (1–100 нм) относят к наночастицам, которые вследствие своих малых размеров имеют свойства, отличные от свойств более крупных коллоидных частиц [33].

Публикации о поведении взвешенных частиц продуктов коррозии в теплоносителе сверхкритических параметров под воздействием ионизирующего излучения немногочисленны. Обзор научных работ последнего десятилетия, в которых исследовались свойства продуктов коррозии в коллоидных системах и делались попытки охватить критические аспекты, влияющие на поведение продуктов коррозии, присутствующих в коллоидной форме в теплоносителе I контура энергоблоков с PWR, выполнен в [16, 17, 32]. В [32] показано, что в воде сверхкритических параметров эффекты, вызванные радиолизом, могут приводить к образованию коллоидных систем из продуктов коррозии, находящихся в ионной форме. Результаты экспериментов [17] подтвердили, что воздействие гамма-излучения на водные растворы, содержащие ионные соединения Fe^{2+} , приводит к образованию однородных по размеру коллоидных частиц. Твердая фаза этих коллоидных частиц идентифицирована как $\gamma\text{-FeOOH}$ (лепидокрокит). При малой продолжительности облучения или в растворах с низкой начальной концентраций Fe^{2+} образуются сферические частицы размером менее 10 нм. При более продолжительном облучении эти коллоидные частицы растут, образуя дендритную структуру размером около 60 нм. Дальнейшее облучение не приводило к изменению размера частиц. Этот результат хорошо согласуется с выводами работ [12, 35, 36] о том, что фазовый состав продуктов коррозии, присутствующих в виде взвешенных частиц в теплоносителях и коррозионных отложениях на теплопередающих поверхностях ядерных энергетических установок, независимо от их типа определяется наряду с магнетитом (Fe_3O_4) также гематитом ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) и лепидокрокитом ($\gamma\text{-FeOOH}$).

Стандартная процедура разделения продуктов коррозии на растворимые и дисперсные (нерастворимые) фракции, принятая на европейских и американских АЭС, заключается в пропускании проб теплоносителя через мембранный микропористый фильтр (размер пор 0.45 мкм) и анализе осадка на фильтре (на наличие взвеси или нерастворимых частиц) и фильтрата (на наличие рас-

творимых частиц) [16, 37, 38]. Результаты исследований распределения продуктов коррозии по размерам частиц показывают, что коллоидная фракция разделена между этими двумя фазами. Коллоидные фракции продуктов коррозии будут присутствовать как в осадке, задержанном на фильтре в нерастворимых фракциях [16], так и в фильтрате после микрофильтра.

В [16] получено, что во время работы энергоблоков с PWR на номинальном уровне мощности (температура ниже критической) в теплоносителе преобладают частицы размером от 0.6 до 1.0 мкм, превосходя по численности все другие фракции и достигая 90% всех частиц. Однако массовая доля этих взвесей составляет всего 14% массы всех взвешенных частиц. В переходных режимах и при останове энергоблока доля фракций размером от 0.8 до 1.0 мкм увеличилась в 590 раз, в то время как доля частиц размером 5–6 мкм увеличилась в 13 раз. В целом, частицы размером менее 2 мкм составили 99% всех частиц (80% по массе).

Результаты исследований, в которых изучался дисперсный состав примесей проб теплоносителя и оценивалось распределение частиц продуктов коррозии по размерам в теплоносителе европейских энергоблоков с PWR, довольно противоречивы (см. таблицу) [16, 37, 38]. В то же время согласно [38] только 20% частиц имеют размер более 0.45 мкм, тогда как по данным [37] доля таких частиц составляет почти 70%. По оценкам [16] 80% частиц, содержащихся в фильтрате мембранного микропористого фильтра, могут быть коллоидами, а не находиться в истинно растворенном состоянии (однако присутствие коллоидной фракции во многих работах даже не упоминается). На долю частиц размером менее 100 нм приходится 2–5% общей активности в теплоносителе, что может означать, что доля этой фракции незначительна, в частности, потому, что она традиционно рассматривается как часть продуктов коррозии, находящихся в истинно растворенном состоянии.

В российской практике принятая методика определения дисперсного состава примесей включает в себя два этапа [8, 39]. На первом этапе в специальных фильтрах-накопителях проводятся фракционирование и концентрирование примесей путем последовательной фильтрации пробы теплоносителя через мембранные микрофильтры. На фильтрах-накопителях происходит разделение примесей на две составляющие: растворенную (ионы и коллоиды, сорбирующиеся на ионитах) и нерастворенную (частицы, эффективный диаметр которых превышает 0.2 мкм). При такой классификации в [8, 35, 39] получено, что в реакторной воде ВВЭР-1000 доля взвеси на микрофильтрах размером пор 0.2 мкм составила 90–95% общей концентрации соединений железа, т.е. соединения железа в реакторной воде согласно [8] практически полностью присутствуют

Спектр дисперсности частиц продуктов коррозии в теплоносителе I контура энергоблоков с PWR

Размер фракции, мкм	Доля частиц, %	
	[16, 37]	[38]
Более 3.0	—	50
0.45–3.00	20	19
0.01–0.45	8	31
0.05–0.10	72	—

в виде взвесей. Однако формально этот осадок включает в себя коллоидные фракции, поскольку верхняя граница условного размера коллоидов установлена в [34] до 1 мкм.

При переходе в сверхкритическую область ограничения в понимании поведения продуктов коррозии в коллоидных системах вызваны в первую очередь отсутствием информации о влиянии ионизирующего излучения и продуктов радиолиза воды на процессы образования и характеристики коллоидной фазы продуктов коррозии в околокритической области. Тем не менее, результаты [16, 17, 32, 33] показывают, что перенос продуктов коррозии в коллоидной форме или в истинно пересыщенном растворе в теплоносителе ВВЭР-СКД возможен в значительно более высоких концентрациях, чем следует из традиционного подхода, основанного на равновесной термодинамике. Поэтому возникают вопросы о том, какой механизм будет контролировать улавливание продуктов коррозии на ВТФ энергоблоков ВВЭР-СКД и каким образом следует учитывать коллоидные формы существования продуктов коррозии в теплоносителе при рабочих параметрах ВВЭР-СКД.

Ограниченность текущего понимания химических процессов в водном теплоносителе сверхкритических параметров наряду с недостатком данных по механизму контроля улавливания продуктов коррозии на ВТФ является одной из главных проблем, решение которых необходимо для выбора и обоснования систем поддержания качества теплоносителя ВВЭР-СКД. С учетом вышеизложенного, скорее всего, при использовании на энергоблоках с ВВЭР-СКД системы высокотемпературной фильтрации теплоносителя, аналогичной СВО-1, следует ожидать, что проблемы, отмеченные при эксплуатации ВТФ на серийных энергоблоках с ВВЭР-1000, будут усугубляться.

ВЫВОДЫ

1. Анализ опыта эксплуатации, а также оценки поведения радионуклидов коррозионного происхождения в области околокритических и сверхкритических параметров показывает, что при использовании системы высокотемпературной фильтрации теплоносителя на энергоблоках с ВВЭР-СКД можно ожидать усугубле-

ния проблем, отмеченных при эксплуатации ВТФ на серийных энергоблоках с ВВЭР-1000, в части снижения эффективности удаления продуктов коррозии.

2. Применение высокотемпературных фильтров на энергоблоках ВВЭР-СКД представляется нецелесообразным без совершенствования технологии фильтрации и повышения эффективности очистки теплоносителя I контура от радионуклидов коррозионного происхождения. Для этого необходимо решение следующих задач:

разработка эффективной технологии химической регенерации сорбента;

обоснование количественных критериев эффективности высокотемпературной фильтрации;

преодоление проектных недостатков технологической схемы гидроперегрузки сорбента высокотемпературных фильтров;

оптимизация/создание ВТФ новой конструкции, позволяющей сделать обращение с высокотемпературным сорбентом более технологичным;

создание методик эксплуатационного контроля эффективности высокотемпературной фильтрации;

разработка технологии подготовки высокотемпературного сорбента перед его использованием для очистки теплоносителя I контура и методов измерения сорбционной способности фильтрующей загрузки в процессе эксплуатации;

определение предельного срока службы высокотемпературного сорбента;

совершенствование технологии кондиционирования и захоронения отработанного сорбента.

3. При решении задачи повышения эффективности высокотемпературной фильтрации при сверхкритических параметрах важен учет коллоидной фазы продуктов коррозии. Ограничения в понимании поведения продуктов коррозии в коллоидных системах вызваны, в первую очередь, отсутствием информации о влиянии ионизирующего излучения и продуктов радиолиза воды на процессы образования и характеристики коллоидной фазы продуктов коррозии в области околокритических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Асмолов В.Г.** Перспективы развития технологии ВВЭР // Доллежалевские чтения. VII–VIII циклы: сб. лекций и презентаций. М.: Изд-во АО НИКИЭТ, 2024. С. 71–102. [Электрон. ресурс.]
2. **Концепция** ядерной энергетической установки на базе многоцелевого тестового исследовательского реактора малой мощности с легководным теплоносителем сверхкритических параметров / А.А. Седов, В.Ю. Бландинский, Я.А. Котов, Д.С. Кузенкова, А.С. Лапин, В.А. Невиница, С.Б. Пустовалов, А.С. Степанов, С.А. Субботин, П.А. Фомиченко, Б.И. Фонарёв, А.А. Фролов //

- Теплоэнергетика. 2023. № 5. С. 5–22.
<https://doi.org/10.56304/S0040363623050065>
3. Харитонов Н.Л., Тяпков В.Ф. Водно-химические режимы ядерных энергетических установок с ВВЭР-СКД: Выбор и обоснование (обзор) // Теплоэнергетика. 2024. № 8. С. 55–69.
<https://doi.org/10.56304/S0040363624700140>
 4. О применении опыта тепловой и атомной энергетики для выбора ВХР инновационной реакторной установки ВВЭР-СКД. Ч. 2 / Е.Б. Юрчевский, В.П. Семишкин, И.А. Чусов, Ю.А. Безруков, О.Ю. Кавун, Н.В. Шарый // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2024. № 3. С. 83–85.
<https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.07>
 5. Гришин А.А., Мацкевич Г.В., Сотников Л.Ф. Система высокотемпературной очистки первого контура ВВЭР-1000 // Сб. докл. первой межотраслевой конференции по ВХР АЭС. Л.: ВНИПИЭТ, 1979. Т. 1. С. 276–288.
 6. Heitman H. Hochtemperaturfiltration in Kernkraftwerken zur Reduzierung der Korrosionsprodukte und der Radioaktivität // Vom Wasser. 1980. Bd. 55. S. 199–216.
 7. Активированные продукты коррозии в главном циркуляционном контуре ВВЭР-1000 / Л.М. Лузанова, Н.В. Задонский, А.Ф. Швоев, А.С. Пискун, О.С. Зубков, Г.Н. Теплова // Атомная энергия. 1990. Т. 68. Вып. 1. С. 52–56.
 8. Влияние высокотемпературной фильтрации на состав примесей теплоносителя первых контуров энергоблоков с ВВЭР-1000 / А.А. Ефимов, Л.Н. Москвин, Б.А. Гусев, Г.Г. Леонтьев, С.Н. Некрасьин // Теплоэнергетика. 1992. № 10. С. 49–52.
 9. Анализ эффективности работы высокотемпературного механического фильтра на действующих АЭС с ВВЭР-1000 / В.Г. Крицкий, В.В. Царев, Н.А. Прохоров, С.Н. Шибков, А.В. Андреев, В.А. Перлова, О.А. Репин // Теплоэнергетика. 1992. № 7. С. 15–19.
 10. Повышение эффективности вывода продуктов коррозии штатными фильтрами очистки теплоносителя из первых контуров водо-водяных реакторов (ВВР) / И.С. Орленков, В.М. Красноперов, Б.А. Гусев, Л.Н. Москвин // Теплоэнергетика. 1998. № 11. С. 17–19.
 11. Тяпков В.Ф., Хамьянов Л.П., Повалишин Н.Б. Оценка влияния высокотемпературных фильтров на мощность дозы излучения от оборудования первого контура на реакторах ВВЭР-1000 // Теплоэнергетика. 2008. № 7. С. 6–9.
 12. Гусев Б.А., Красноперов В.М. Влияние системы высокотемпературной очистки теплоносителя на АЭС с ВВЭР-1000 на формирование дозовых нагрузок // Теплоэнергетика. 2011. № 5. С. 34–36.
 13. Стырикович М.А., Мартынова О.И., Миропольский З.Л. Процессы генерации пара на электростанциях: учеб. для энергетических специальностей вузов / под общ. ред. М.А. Стыриковича. М.: Энергия, 1969.
 14. Materials and water chemistry for supercritical water-cooled reactors / D. Guzonas, R. Novotny, S. Penttile, A. Toivonen, W. Zheng. Elsevier Ltd, 2018.
 15. Guzonas D.A., Cook W.G. Cycle chemistry and its effect on materials in a supercritical water-cooled reactor: A synthesis of current understanding // Corros. Sci. 2012. V. 65. P. 48–66.
 16. Colloidal impacts on PWR primary coolant radiation field generation: literature review and gap assessment. USA, California, Palo Alto: EPRI, 2023. 3002026588.
 17. Iron oxyhydroxide colloid formation by gamma-radiolysis / P.A. Yakabuskie, J.M. Joseph, P. Keech, G.A. Botton, D.A. Guzonas, J.C. Wren // Phys. Chem. Chem. Phys. 2011. V. 13. P. 7198–7206.
 18. Поведение продуктов коррозии кобальта в конденсатно-питательном тракте РБМК / О.И. Мартынова, Ю.Ф. Самойлов, Т.И. Петрова, Н.Л. Харитонов // Атомная энергия. 1989. Т. 66. Вып. 4. С. 241–244.
 19. Samoilov Ju.F., Petrova T.I., Kharitonova N.L. Cobalt corrosion products solubility in water solutions containing oxidizing agents at high parameters // Proc. of the 10th Intern. Conf. on the Properties of Water and Steam. Moscow, USSR, 3–7 Sept. 1984. V. 2. P. 286–289.
 20. Cook W.G., Olive R.P. Corrosion product transport and deposition in the Canadian supercritical water-cooled reactor // Proc. of the 16th Intern. Conf. on the Properties of Water and Steam. L., UK, University of Greenwich, 1–5 Sept. 2013.
 21. Olive R.P. Pourbaix diagrams, solubility predictions and corrosion-product deposition modelling for the supercritical water-cooled reactor: PhD Thesis. USA, University of New Brunswick; Department of Chemical Engineering, 2012.
 22. Brosseau L., Guzonas D., Tremaine P. The solubility of magnetite and nickel ferrite under supercritical water reactor coolant conditions // 2nd Canada-China Joint Workshop on Supercritical Water-Cooled Reactors. Toronto, Ontario, Canada, 25 Apr. 2010.
 23. International association for the properties of water and steam, revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam. International Association for the Properties of Water and Steam. S. 1.: IAPWS, 2007. <http://www.iapws.org/relguide/IAPWS-95.html> (Дата обращения 30.09.2024.)
 24. Helgeson H.C., Kirkham D.H., Flowers G.C. Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes by high pressures and temperatures; IV, calculation of activity coefficients, osmotic coefficients, and apparent molal and standard and relative partial molal properties to 600 degrees C and 5 kb // Am. J. Sci. 1981. V. 281. Is. 10. P. 1249–1516.
 25. Styrikovich M.A. Steam solutions // Vestn. Akad. Nauk. SSSR. 1969. V. 39. No. 12. P. 70–77.
 26. Растворимость магнетита в кипящей воде высокой температуры / М.А. Стырикович, О.И. Мартынова, И.Ф. Кобяков, В.Л. Меньшикова, М.И. Резников // Теплоэнергетика. 1971. № 7. С. 82–84.
 27. Sweeton F., Baes C. The solubility of magnetite and hydrolysis of ferrous ion in aqueous solutions at elevated temperatures // J. Chem. Thermodyn. 1970. V. 2. Is. 4. P. 479–500.
 28. Tremaine P.R., LeBlanc J.C. The solubility of magnetite and the hydrolysis and oxidation of Fe^{2+} in water to 300°C // J. Solution Chem. 1980. V. 9. P. 415–442.
 29. Растворимость продуктов коррозии нелегированной стали в кислородсодержащих водных растворах при повышенных параметрах / О.И. Мартынова,

- Ю.Ф. Самойлов, Т.И. Петрова, Н.Л. Харитоновна // ТВТ. 1983. Т. 21. № 5. С. 913–918.
30. **Растворимость** магнетита в условиях восстановительной среды в воде АЭС при повышенной температуре / В.И. Зарембо, В.Г. Крицкий, Л.В. Пучков, А.А. Слободов // Атомная энергия. 1988. Т. 64. Вып. 3. С. 226–228.
 31. **СТО 1.1.1.02.005.0004-2012.** Водно-химический режим первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. Нормы качества теплоносителя и средства их обеспечения. М.: Росэнергоатом, 2012.
 32. **Monitoring** synchrotron X-ray-induced radiolysis effects on metal (Fe, W) ions in high-temperature aqueous fluids / R.A. Mayanovic, A.J. Anderson, S. Pascarelli, G. Aquilanti // J. Synchrotron Radiat. 2012. V. 19. Part 5. P. 797–805.
<https://doi.org/10.1107/S0909049512029093>
 33. **Алексеев В.А.** Перенос металлов в гидротермальных условиях в виде коллоидных частиц и пересыщенных истинных растворов // Геохимия. 2023. Т. 68. № 6. С. 608–621.
 34. **IUPAC.** Compendium of chemical terminology. 2nd ed. (the “Gold Book”). Compiled by A.D. McNaught and A. Wilkinson. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1997. Online version (2019) created by S.J. Chalk.
<https://doi.org/10.1351/goldbook>
 35. **Очистка** водных сред от примесей оксидов железа методом высокоградиентной магнитной фильтрации (обзор) / Б.А. Гусев, А.А. Ефимов, Л.Н. Москвин, В.В. Панчук // Теплоэнергетика. 2023. № 4. С. 33–43.
<https://doi.org/10.56304/S0040363623040033>
 36. **Харитоновна Н.Л., Тяпков В.Ф.** Термодинамический анализ форм существования оксидов железа в нейтральных кислородсодержащих водных средах энергоблоков АЭС // Теплоэнергетика. 2020. № 1. С. 23–31.
<https://doi.org/10.1134/S0040363620010038>
 37. **Characterization** of colloids in primary coolant, water chemistry of nuclear reactor systems / M. Bolz, W. Hoffmann, W. Rühle, F. Becker // Proc. of the British Nuclear Energy Society (BNES) Conf. V. 1. Bournemouth, UK, 13–17 Oct. 1996. P. 42–46.
 38. **Roesmer J.** An assessment of the composition of PWR coolant near the operating temperature // Proc. of 1988 JAIF Intern. Conf. on Water Chemistry in Nuclear Power Plants. Tokyo, Japan, 19–22 Apr. 1988. V. 2. P. 462–467.
<https://inis.iaea.org/search/20019323>
 39. **Методы** химического и радиохимического контроля в ядерной энергетике / Л.Н. Москвин, М.Ф. Гумеров, А.А. Ефимов, В.М. Красноперов, Г.Г. Леонтьев, В.А. Мельников; под ред. Л.Н. Москвина. М.: Энергоатомиздат, 1989.

Application of High-Temperature Mechanical Filtration of the Primary Coolant at a VVER-SCW Nuclear Power Unit

N. L. Kharitonova^{a, *} and V. F. Tyapkov^{a, **}

^a National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: NLKharitonova@mephi.ru

**e-mail: vladimirtyapkov@yandex.ru

Abstract—The issues are examined associated with application of high-temperature mechanical filtration of the coolant for rendering proper water chemistry (WC) in the primary circuit of a supercritical water-cooled power reactor (VVER-SCW reactor). A critical analysis of the use of high-temperature filters (HTFs) in a dual-circuit VVER-SCW nuclear power plant is presented. The main challenges associated with the introduction of the high-temperature filtration technology under the primary circuit operating conditions, which was developed and implemented in the design of the unified VVER-1000 unified reactor plant, are outlined. The features of HTF operation under supercritical conditions are examined. The causes responsible for the change in the behavior of corrosion products on transition to operation in the region of near-critical and supercritical parameters are analyzed. The calculated and experimental values of the solubility of corrosion products in the water coolant under near-critical and supercritical conditions are assessed. It has been demonstrated that the transition to near-critical and supercritical operating conditions increases the degree of oversaturation of the coolant with iron and nickel, thereby facilitating further dominance of the fraction of suspended particles in it compared to compounds in a truly dissolved state. The effect the transition to the near-critical and supercritical operating conditions has on the characteristics of suspended particles of corrosion products in the coolant and the HTF efficiency was analyzed. A proposal has been made that the effects of radiolysis in supercritical water enhances the importance of colloidal systems formed from the corrosion products. It has been demonstrated that, if high-temperature mechanical filtration systems of the coolant are used at VVER-SCW power units, one can expect that the problems encountered during their (HTFs) operation at series power units with a VVER-1000 reactor will worsen. Potential ways are proposed for improving the technology of high-temperature filtration in the primary circuit of VVER-SCW nuclear power units.

Keywords: VVER-SCW, water coolant, water chemistry, high-temperature filter, corrosion products, solubility, colloid particles