

О ПРИМЕНЕНИИ ОПЫТА ТЕПЛОВОЙ И АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ВЫБОРА ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ИННОВАЦИОННОЙ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-СКД. ЧАСТЬ 2

Юрчевский Е.Б., Семишкин В.П., Чусов И.А., Безруков Ю.А., Кавун О.Ю., Шарый Н.В.

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»,

142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21



В первой части работы [1] был рассмотрен опыт тепловой и атомной энергетики в выборе и ведении водно-химических режимов прямоточных паротурбинных блоков СКД и одноконтурных атомных энергоблоков. Вторая часть работы посвящена решению нескольких взаимосвязанных задач, в конечном итоге определяющих работоспособность реакторной установки ВВЭР-СКД и ряда вспомогательных систем. Показано, что поскольку проблемы коррозии и эрозии были одними из основных при внедрении паротурбинных установок СКД на органическом топливе, необходимо проведение дополнительных стендовых и реакторных испытаний перспективных сталей. Анализ опыта эксплуатации существующих высокотемпературных систем очистки на энергоблоках с ВВЭР-1000 и БН-600 дает основание ожидать, что установка высокотемпературного обезжелезивающего фильтра перед реактором ВВЭР-СКД снизит отложения активированных продуктов коррозии на теплопередающих поверхностях от реактора до конденсатора турбины, и, соответственно, интенсивность радиационного воздействия на эксплуатационный и ремонтный персонал, а также разгрузит ионообменные фильтры при изменении режимов работы энергоблока от продуктов коррозии и адсорбированных на них радионуклидов. Показано, что разработанная технология очистки жидких сред с помощью фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами к настоящему времени недостаточно обоснована и экспериментально подтверждена. В работе показано, что для обессоливания добавочной воды должны использоваться ионообменные либо мембранные технологии. Основными выводами, следующими из работы, являются: для эксплуатации в номинальном режиме главного контура инновационного атомного энергоблока на основе реакторной установки ВВЭР-СКД рекомендуется нейтральный бескоррекционный ВХР; с целью снижения риска образования железистых отложений на теплопередающих поверхностях реактора и предотвращения заноса проточной части турбины целесообразно применить полнопоточное высокотемпературное обезжелезивание питательной воды; при

проектировании и создании пилотного образца ВВЭР-СКД необходимо предусмотреть возможность проведения анализа эффективности использования обезжелезивающих электромагнитных фильтров в условиях нейтрального ВХР и при проектных параметрах теплоносителя.

Ключевые слова: высокотемпературный обезжелезивающий фильтр, обессоливание, прямоточный, паротурбинный, наноструктурные мембраны, электромагнитный фильтр, обезжелезивание, водно-химический режим.

Для цитирования: Юрчевский Е.Б., Семишкин В.П., Чусов И.А., Безруков Ю.А., Кавун О.Ю., Шарый Н.В. О применении опыта тепловой и атомной энергетики для выбора водно-химического режима инновационной реакторной установки ВВЭР-СКД. Часть 2. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 81–94. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.07>

ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА. ОЧИСТКА ТУРБИННОГО КОНДЕНСАТА

Основные предложения по водно-химическому режиму (ВХР) и по показателям качества питательной воды одноконтурной реакторной установки ВВЭР-СКД представлены в [2]. Турбинный конденсат является основным компонентом питательной воды. Его доля составляет около 90% от объема питательной воды. Условия создания, нормы и требования, предъявляемые к блочным обессоливающим установкам (БОУ) для глубокого обессоливания и обезжелезивания всего потока турбинного конденсата являются обязательным элементом конденсатно-питательного тракта энергоблоков СКД с прямоточными котлами. Кроме конденсата турбин, через БОУ проходит конденсат, возвращаемый из систем собственных нужд, а также добавочная вода для восполнения неизбежных потерь в цикле. Применение в обессоливающих фильтрах БОУ ионообменных смол ограничивает температуру обрабатываемой воды на уровне 50–60°C. В проведенных проработках ВВЭР-СКД предусмотрено применение высокотемпературного предреакторного обезжелезивания водного теплоносителя.

Источниками продуктов коррозии в контуре циркуляции теплоносителя являются аустенитные нержавеющие стали, которые являются основными кандидатными конструкционными материалами для изготовления оборудования, внутрикорпусных устройств (внутрикорпусная шахта, выгородка, блок защитных труб) и трубопроводов реакторной установки [3–4]. Несмотря на весьма низкую скорость общей коррозии этих сталей в теплоносителе, в контуре циркуляции постоянно проходят процессы коррозии и массопереноса продуктов коррозии (ПК). Перенос и осаждение ПК на теплопередающих поверхностях затрудняет теплообмен, снижает КПД реакторной установки, приводит к локальным перегревам и более быстрому разрушению металла на соответствующих участках контура. Попадающие в активную зону ПК активируются, переносятся по контуру и, осаждаясь на различных участках вне активной зоны, увеличивают уровень излучения от оборудования.

Установлено, что незначительная часть этих ПК (от 1 до 5%) растворена и взвешена в теплоносителе, а остальная часть находится в виде очень тонких коррозионных пленок (толщина около 1 мкм) и рыхлых отложений на поверхности конструкционных материалов контура [3]. Защитные пленки на поверхности нержавеющих сталей формируются из хромоникелевых шпинелей. Такие пленки обладают минимальной пористостью, благодаря

чему защищают основной массив металла, а рыхлые отложения состоят из смеси магнетита и гематита.

О ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПИЛОТНОГО ОБРАЗЦА ВВЭР-СКД

При выборе технологии высокотемпературного обезжелезивания водного теплоносителя для ВВЭР-СКД важнейшим вопросом является выбор ее производительности. Номинальная производительность низкотемпературной системы очистки СВО-1 для ВВЭР-440 и малой серии ВВЭР-1000 принята равной 400 м³/ч (по 100 м³/ч на каждой петле) или 0,5% от расхода теплоносителя. Такая производительность принята на основании решения уравнений материального баланса по продуктам коррозии в контуре циркуляции, исходя из необходимости обеспечения равенства количества ПК, поступающих в контур циркуляции в результате коррозии, процессов массопереноса ПК и количества взвеси из ПК, задерживаемых на фильтрах. Высокотемпературная система обезжелезивания для большой серии ВВЭР-1000 также рассчитана на очистку только 0,5% от полного расхода теплоносителя. Принятая производительность высокотемпературной системы обезжелезивания приемлема для условия работы реакторной установки при номинальной нагрузке, когда усредненная концентрация ПК в теплоносителе находится в пределах 20–50 мкг/кг.

Для условий эксплуатации пилотного образца ВВЭР-СКД-50, а также первого коммерческого образца ВВЭР-СКД-1700, весьма вероятно работа в переменных режимах (останов и расхолаживание, изменение расхода теплоносителя), когда резко, иногда на несколько порядков, увеличивается концентрация ПК и, соответственно, возрастает активность в теплоносителе. Например, в первом контуре ВВЭР после включения насоса на расхолаженном реакторе максимальная активность теплоносителя отмечается приблизительно через полчаса-час и возвращается к средним значениям приблизительно через 7–8 часов [5], что иллюстрируется рис. 1.

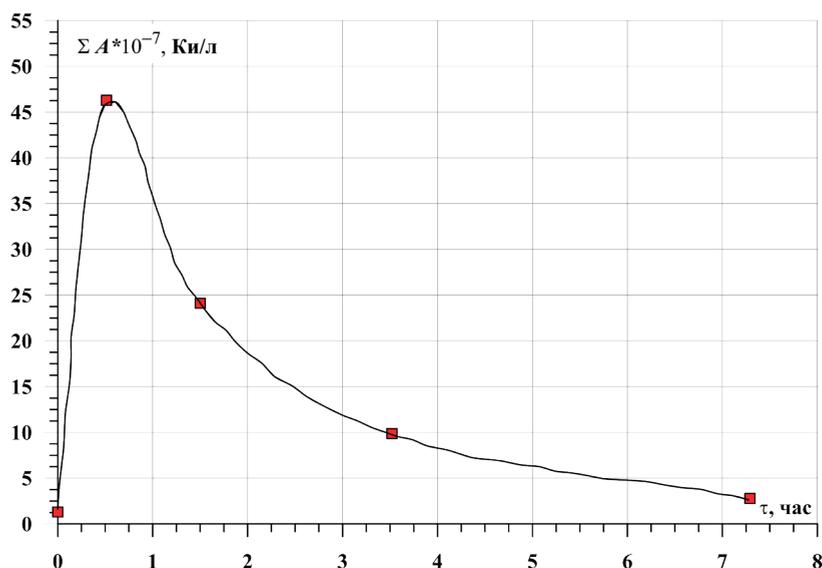


Рис. 1. Изменение суммарной активности водного теплоносителя с момента включения насоса [5]

На рисунке 1 крутая восходящая ветвь кривой обусловлена быстрым смывом активированных ПК (АПК) с поверхностей контура при пуске насоса, а нисходящая ветвь характеризует процессы постепенного осаждения АПК. Исследования, выполненные на АЭС с ВВЭР и РБМК, показали, что наличие в переходных режимах «всплесков» активности АПК характерно для любых ядерных реакторов с водяным охлаждением, независимо от их типа и назначения. Известно, что высокотемпературные фильтры, как и другие сорбционные фильтры, наиболее эффективно задерживают взвеси при их высокой концентрации в фильтруемой среде, что показано на рис. 2.

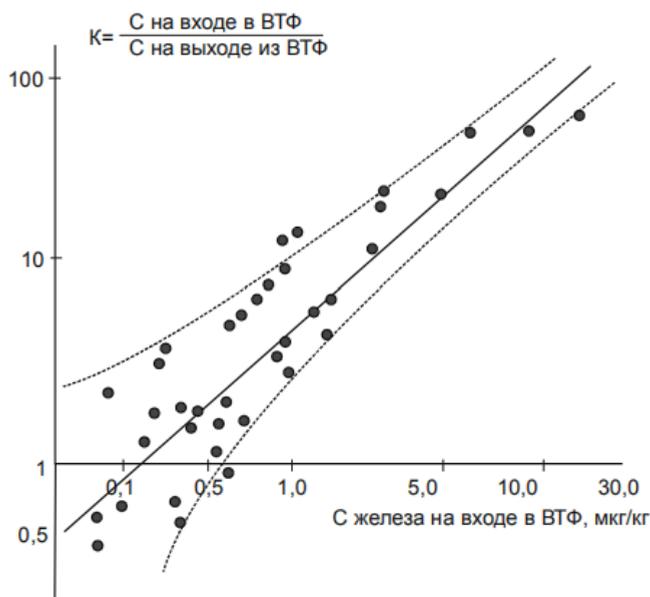


Рис. 2. Зависимость коэффициента очистки теплоносителя от железа на ВТФ от концентрации железа в теплоносителе [6]

Характер кривой на рис. 1 с учетом зависимости на рис. 2 показывает, что наибольшая эффективность очистки теплоносителя, исчисленная в абсолютных единицах, может быть обеспечена фильтрацией водного теплоносителя в течение 0,5–3 часов с момента включения насоса. За пределами этого временного отрезка большая часть АПК уже осаждается на поверхности контура. Следовательно, только скоростная высокотемпературная очистка всех 100% водного теплоносителя в период его максимальной загрязненности взвешенными ПК позволит наиболее эффективно и быстро вывести их из контура циркуляции.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ НА АЭС

Впервые высокотемпературные обезжелезивающие фильтры ВТФ были установлены на головном энергоблоке Запорожской АЭС в 1984 г., а затем на энергоблоках 1–4 Балаковской АЭС, а также энергоблоках 1–6 Запорожской АЭС, пятом и шестом энергоблоках АЭС «Козлодуй», третьем энергоблоке Ровенской АЭС, первом энергоблоке Хмельницкой АЭС, третьем энергоблоке Южно-Украинской АЭС. Очистка теплоносителя высокотемпературными фильтрами производится при рабочих параметрах теплоносителя первого контура (температура около 290°C, давление 16 МПа), что достаточно близко к вероятным

параметрам питательной воды ВВЭР-СКД (температура около 280°C, давление 25 МПа). Экспериментальные исследования процессов улавливания ПК с помощью высокотемпературных фильтров, загруженных губчатым титаном, были проведены на первом блоке Запорожской АЭС в ходе первых двух топливных циклов. Опыт эксплуатации ВТФ, а также результаты гамма-спектрального анализа показали, что основное количество мелкодисперсных продуктов коррозии задерживается в верхнем (лобовом) слое сорбента высотой до 400 мм. Этот слой способен задержать от 1,5 до 3 кг активированных продуктов коррозии. Часть накопившихся продуктов в ВТФ вымывается при проведении взрыхляющей промывки сорбента и его отмывке химреагентами. На рисунке 3 приведено распределение мощности дозы по высоте сорбента. Проведенные после первой топливной кампании замеры мощности дозы и характера ее распределения приблизительно одинаковы для всех четырех высокотемпературных фильтров (кривая 1). Максимальное значение дозы соответствует поверхности сорбента.

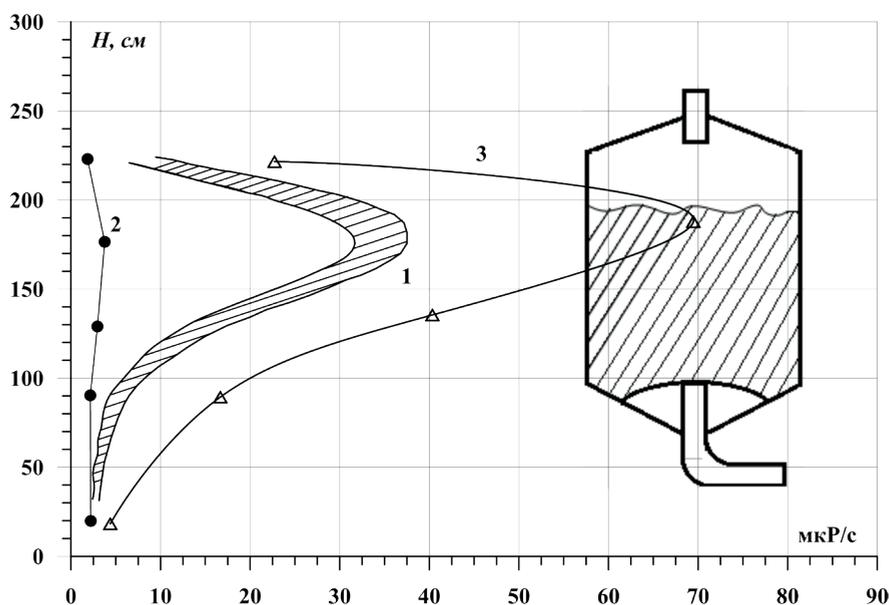


Рис. 3. Распределение мощности дозы по высоте фильтрующей загрузки [7]

Перед началом второго топливного цикла три фильтра были отмыты от задержанного шлама, что снизило дозу в шесть раз (кривая 2). Один из фильтров не промывался. После второго топливного цикла мощность дозы для этой группы фильтров вновь характеризовалась кривой 1. У непромытого фильтра после второй топливной кампании мощность дозы возросла вдвое (кривая 3). Проведенные исследования эффективности применения высокотемпературных фильтров на Балаковской, Калининской и Запорожской АЭС показали, что очистка части теплоносителя через СВО-1 позволяет снизить удельную активность теплоносителя первого контура до уровней 10^{-5} – 10^{-4} Ки/кг, снизить накопление продуктов коррозии в контуре, уменьшить радиационные поля от активного оборудования в 5–10 раз. Следствием этого является снижение концентраций железа до нормируемых значений, концентрирование радионуклидов на высокотемпературных фильтрах и, самое главное, снижение радиоактивных отложений на внутренних поверхностях вне активной зоны реактора и, соответственно, снижение мощности дозы от оборудования первого контура. Проведенный анализ опыта эксплуатации высокотемпературных фильтров, выполненный

специалистами ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» и АО ВНИИАЭС, привел к следующим основным выводам [8]:

- существует пороговая концентрация железоксидных взвесей в теплоносителе на уровне 0,2–0,45 мкг/кг. Ниже этой концентрации задержание взвесей на фильтрующей загрузке не происходит, наоборот, из сорбентов в незначительных количествах вымываются наиболее крупные фракции ранее задержанных взвесей; важно подчеркнуть, что фракции 0,2–0,4 мкм составляют основную долю активированных продуктов коррозии;

- при концентрациях взвесей в теплоносителе выше пороговых, в том числе в переходных режимах работы энергоблоков, происходит очистка теплоносителя за счет удерживания грубодисперсной фракции продуктов.; активированные продукты коррозии эффективно задерживаются титановым сорбентом.

Высокотемпературная очистка теплоносителя от продуктов коррозии испытывалась также в условиях третьего контура энергоблока БН-600 с использованием оригинальной конструкции высокотемпературного фильтра [9]. В составе установки высокотемпературной очистки теплоносителя третьего контура предусмотрены два фильтра, загруженные сорбентом на основе диоксида титана, а также фильтр-регенератор. На рисунке 4 изображен высокотемпературный фильтр для третьего контура БН-600.

Анализ опыта эксплуатации существующих высокотемпературных систем очистки на энергоблоках с ВВЭР-1000 и БН-600 дает основания ожидать, что установка высокотемпературного обезжелезивающего фильтра перед реактором ВВЭР-СКД снизит отложения АПК на теплопередающих поверхностях от реактора до конденсатора турбины, и, соответственно, интенсивность радиационного воздействия на эксплуатационный и ремонтный персонал, а также разгрузит ионообменные фильтры при изменении режимов работы энергоблока от продуктов коррозии и адсорбированных на них радионуклидов.

Для пилотной ВВЭР-СКД мощностью 50 МВт ориентировочный расход теплоносителя составит около 200 т/ч, что позволит обеспечить его 100%-ную очистку при скорости фильтрования 100 м/ч использованием 2,0 м² фильтрующей поверхности (1 фильтрующий аппарат диаметром 1,6 м). Однако для 100%-ной очистки водного теплоносителя сравнительно малая единичная производительность высокотемпературных фильтров обусловит значительные проблемы. При скорости фильтрования 100 м/ч (максимальной для испытанных сорбционных фильтров) и диаметре фильтра 3,4 м (максимальном диаметре по условиям железнодорожных перевозок) предельная единичная производительность фильтра составит 900 м³/ч. Чтобы обеспечить 100%-ную очистку водного теплоносителя, потребуется в габаритах защитной оболочки реактора разместить на каждой нит-

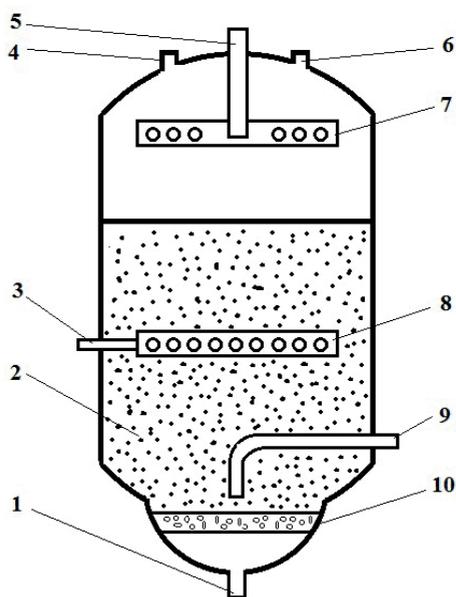


Рис. 4. Высокотемпературный фильтр для третьего контура БН-600 [2]: 1 – отвод фильтрата; 2 – сорбент; 3 – подвод взрыхляющей воды; 4 – штуцер сдувки; 5 – подвод обрабатываемой воды; 6 – штуцер гидрозагрузки; 7 – верхнее распределительное устройство; 8 – взрыхляющее распределительное устройство; 9 – гидровыгрузка; 10 – сборное распределительное устройство

Для пилотной ВВЭР-СКД мощностью 50 МВт ориентировочный расход теплоносителя составит около 200 т/ч, что позволит обеспечить его 100%-ную очистку при скорости фильтрования 100 м/ч использованием 2,0 м² фильтрующей поверхности (1 фильтрующий аппарат диаметром 1,6 м). Однако для 100%-ной очистки водного теплоносителя сравнительно малая единичная производительность высокотемпературных фильтров обусловит значительные проблемы. При скорости фильтрования 100 м/ч (максимальной для испытанных сорбционных фильтров) и диаметре фильтра 3,4 м (максимальном диаметре по условиям железнодорожных перевозок) предельная единичная производительность фильтра составит 900 м³/ч. Чтобы обеспечить 100%-ную очистку водного теплоносителя, потребуется в габаритах защитной оболочки реактора разместить на каждой нит-

ке не менее трех фильтров диаметром 3,4 м, а всего на двух нитках – шесть фильтров, что потребует значительных площадей.

МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ВОДНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ. ФОРМЫ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ ПАРОВОДЯНЫХ КОНТУРОВ АЭС

Спектр образующихся продуктов коррозии в первых контурах АЭС весьма широк. В воде могут присутствовать: соединения железа-II (Fe^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$, $\text{Fe}(\text{OH})_4^{2-}$), приводящие к образованию вюститита – FeO ; соединения, содержащие в молекуле одновременно Fe-II, Fe-III, в итоге образующие магнетит Fe_3O_4 ; соединения Fe-III (Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$), превращающиеся в магемит $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Основными параметрами, определяющими вероятность преимущественного существования той или иной формы оксидов железа, являются водородный показатель, потенциал системы и температура. Термодинамическими расчетами показано, что при значениях pH от 6,0 до 10,5, характерных для теплоносителей АЭС, преобладающими формами продуктов коррозии являются Fe_3O_4 (магнетит) и $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематит). Анализ реальных продуктов коррозии показал, что в условиях первого контура АЭС типа PWR, а также в глубокообессоленной и деаэрированной воде образуется Fe_3O_4 , а в содержащей кислород воде в теплоносителе АЭС с реактором типа BWR преобладает $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [10]. Результаты исследования фазового состава продуктов коррозии оборудования технологических контуров, присутствующих в виде взвешенных частиц и в форме коррозионных отложений на теплопередающих поверхностях ядерных энергетических установок (ЯЭУ), показали, что, независимо от типа реакторных установок (канальные реакторы или реакторы с водой под давлением), фазовый состав продуктов коррозии (как взвесей, так и отложений) определяется, кроме магнетита, также гематитом ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) и лепидокрокитом ($\gamma\text{-FeOOH}$), соотношение количеств которых зависит от применяемого ВХР, температуры и состава конструкционных материалов. Из перечисленных форм продуктов коррозии только магнетит обладает ферромагнитными свойствами, что позволяет выделять его частицы на магнитных фильтрах.

ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫЕ МАГНИТНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Для высокотемпературного обезжелезивания водного теплоносителя ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» разработал высокоградиентный магнитный фильтр (ВГМФ). Суть предложенного технического решения заключается в пропуске неохлажденного водного теплоносителя через последовательно установленные постоянные магниты и фильтрующие матрицы из металловаты.

Фильтрующая матрица в ВГМФ выполнена из металлической ваты из стали марки 09Х17Н. Магниты защищены от контакта с теплоносителем чехлами из немагнитной нержавеющей стали, что допускает их длительное использование без замены.

Результаты проведенных испытаний ВГМФ показали возможность эффективной очистки водных потоков от парамагнитных частиц ПК размером от долей микрометров до нескольких микрометров в интервале концентраций от десятков до сотен мкг/дм^3 .

По мнению авторов разработки ВГМФ, результаты проведенных исследований свидетельствуют об универсальности метода и возможности выведения на высокоградиентных

магнитных фильтрах практически всех форм продуктов коррозии, присутствующих в технологических средах как ЯЭУ, так и теплоэнергетических установок, а метод магнитной фильтрации в предлагаемой версии может рассматриваться как перспективный для очистки технологических сред как в атомной, так и в тепловой энергетике. В частности, ВГМФ позиционируется как перспектива для очистки теплоносителя первого контура ЯЭУ [10].

Возможность удаления из теплоносителя и магнитных и парамагнитных взвесей с использованием ВГМФ выглядит весьма привлекательной и должна повысить эффективность обезжелезивания теплоносителя. Однако, проведенные исследования показали также характеристику, ограничивающую применимость этой технологии, а именно зависимость эффективности очистки от скорости фильтрования. При скорости фильтрования свыше 4 см/с (144 м/ч) эффективность очистки резко падает.

Проведенные испытания образцов ВГМФ были выполнены на воде бассейна выдержки облученных тепловыделяющих сборок и на стенде-прототипе транспортной ЯЭУ на байпасной линии охлажденного теплоносителя. Использование ВГМФ для высокотемпературного обезжелезивания теплоносителя возможно только при обеспечении необходимого охлаждения постоянных магнитов. Для ВГМФ большой единичной производительности нужны постоянные магниты больших размеров, производство которых пока не освоено российской промышленностью. Принципиальная возможность использования ВГМФ для высокотемпературного обезжелезивания водного теплоносителя для ВВЭР-СКД может быть оценена следующим образом: ВГМФ, при условии решения вопросов с изготовлением больших магнитов и их охлаждением, может быть использован для 100%-ной очистки водного теплоносителя на пилотной установке мощностью 50 МВт, а также может быть использован на коммерческой реакторной установке для байпасной очистки 0,5% расхода теплоносителя. Для 100%-ной очистки водного теплоносителя коммерческого ВВЭР-СКД потребуется разработка фильтров с постоянными магнитами и фильтрующими матрицами, имеющими суммарную площадь фильтрования более 47 м², что труднореализуемо.

НАНОСТРУКТУРНЫЕ МЕМБРАНЫ

В АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» разработана технология очистки жидких сред от нерастворенных радиоактивных примесей с помощью фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами, которые, по мнению разработчиков, могут быть использованы для очистки теплоносителя первого контура АЭС с ВВЭР [11]. Наноструктурные мембраны формируются путем осаждения частиц эрозионной плазмы из титана на пористую подложку. Суть предлагаемой технологии очистки заключается в продавливании воды через пористые наноструктурные мембраны, размер пор которых сопоставим с размером взвешенных в теплоносителе ПК. Проведенные авторами исследования выполнялись на модельных растворах при температуре воды 20–25 °С, фильтрующий слой из титана наносился на полиэтиленовую подложку, испытываемые мембраны имели средний размер пор 0,15–13 мкм. Получены перспективные результаты по эффективности очистки модельных растворов и по средней проницаемости мембран 14 м³/(м²·ч). Исследования очистки высокотемпературных водных теплоносителей не проводились. Опубликованных по результатам проведенных исследований данных пока недостаточно для обоснованного вывода о приемлемости предложенной технологии для высокотемпературной очистки водного теплоносителя.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Как показано выше, основной причиной, не позволяющей пока рекомендовать сорбционные фильтры ВГМФ в схемах 100%-ной очистки водного теплоносителя, является ограниченная 100–150 м/ч скорость фильтрования. Этот недостаток отсутствует у электромагнитных фильтров (ЭМФ), допустимая скорость фильтрования у которых составляет 1000 м/ч (рис. 5).

Эксплуатационные возможности ЭМФ как единственного обезжелезивающего аппарата в схеме БОУ были проверены в течение трехлетней работы экспериментального образца производительностью до 1000 т/ч конструкции ЦКБ Главэнергоремонта Минэнерго СССР, установленного на энергоблоке мощностью 300 МВт Средне-Уральской ГРЭС, на втором энергоблоке Калининской АЭС и многих других объектах энергетики. С первых месяцев работы ЭМФ в схеме энергоблоков прослеживались тенденции к постепенному снижению содержания железистых продуктов коррозии в пароводяном тракте, проявляющиеся в уменьшении концентрации железа в конденсате, поступающем на БОУ. Постепенный вывод продуктов коррозии из контура энергоблока приводит к очистке его поверхностей и уменьшению содержания железа в питательной воде до 5–7 мкг/л.

Объективным показателем результативности включения ЭМФ в схему БОУ тепловых электростанций служит снижение загрязненности нижней радиационной части котла и уменьшение количества промывок. Достоинством ЭМФ являются также высокая разрешенная рабочая температура (до 350°C), что позволяет использовать их для высокотемпературного обезжелезивания водного теплоносителя.

Важно отметить, что с ростом температуры воды (на конденсатоочистке тепловых станций около 50°C, а в ВВЭР-СКД около 280°C) растворимость железа несколько снижается, т.е. железо будет находиться в основном в нерастворенной форме в виде железистого шлама, что должно повысить эффективность обезжелезивания водного теплоносителя. Для случаев обработки больших объемов теплоносителя разработана двухпоточная конструкция ЭМФ производительностью 3600 м³/ч с диаметром 1,5 м. При двухниточной схеме для обезжелезивания потока теплоносителя ВВЭР-СКД-1700 потребуется установка двух электромагнитных фильтров диаметром 2,1 м (по одному ЭМФ на каждой нитке). Также разработана конструкция двухпоточных ЭМФ, имеющих удвоенную производительность при диаметре корпуса как у однопоточного ЭМФ.

Для условий нейтрального бескоррекционного ВХР необходимы предварительные испытания ЭМФ при работе в составе пилотной установки ВВЭР-СКД.

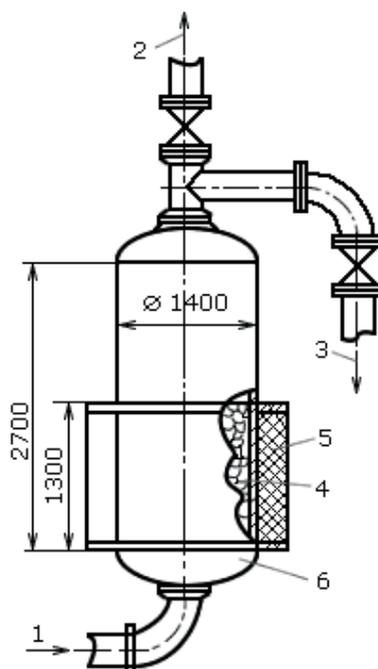


Рис. 5. Электромагнитный фильтр производительностью 1000 м³/ч: 1 – вход конденсата; 2 – выход конденсата; 3 – слив конденсата в дренаж при промывке фильтра; 4 – намагничивающиеся шарики из углеродистой стали; 5 – электрическая катушка для создания магнитного поля; 6 – корпус фильтра из немагнитной аустенитной стали

ОБЕССОЛИВАНИЕ ДОБАВОЧНОЙ ВОДЫ

Обессоливание добавочной воды на АЭС необходимо для восполнения потерь пара, питательной воды и конденсата в контуре циркуляции теплоносителя. Обычно на конденсационных энергоблоках СКД в тепловой энергетике и на АЭС объем добавочной воды составляет около 1% от объема питательной воды. Для подготовки добавочной воды ВВЭР-СКД следует принять апробированные технические решения, единые для энергоблоков СКД на органическом топливе и для ВВЭР. Соответственно, качество добавочной воды для ВВЭР-СКД должно соответствовать требованиям СТО 70238424.27.199.013-2009. Выполнение требований СТО обеспечивает надежность и безопасность эксплуатации водоподготовительных установок. Стандарт базируется на применении отечественных нормативных документов, а также учитывает требования, предъявляемые к водоподготовительному оборудованию национальными стандартами США и ФРГ. Для обессоливания добавочной воды должны, как правило, использоваться ионообменные либо мембранные технологии. И в России, и за рубежом выполнено значительное количество технико-экономических расчетов, обосновывающих выбор технологии обессоливания. Однако общепринятой и закреплённой позиции по этому вопросу не принято [11 – 13].

О ПРИНЦИПАХ ОРГАНИЗАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ВХР ВВЭР-СКД

Система химического контроля и управления параметрами (СКУ) ВХР должна обеспечить оперативное получение достоверной информации о текущем состоянии ВХР, давать прогноз о возможности отклонений нормируемых параметров за пределы заданных значений и выдавать сигнал для действий, направленных на автоматическое восстановление и стабилизацию нормируемых параметров. В задачи СКУ ВХР входит автоматизированный сбор, обработка, документирование и хранение информации в объеме, достаточном для своевременного выявления нарушений нормативных показателей ВХР, а также для формирования и реализации управляющих сигналов. Ближайшим аналогом СКУ ВХР для ВВЭР-СКД являются разработки ЭНИЦ НИУ МЭИ, НИЦ КИ и ИГЭУ для I и II контуров АЭС с ВВЭР-1000, которые были частично использованы на третьем блоке Калининской АЭС, а также для обоих контуров Нововоронежской АЭС-2. Разработанная СКУ ВХР обеспечивает информационную поддержку персонала в части контроля параметров ВХР I и II контуров, идентификацию аномалий водно-химических процессов и причин их возникновения, формирование рекомендаций для принятия решений по управляющим воздействиям при нарушении ВХР. СКУ ВХР должна являться составной частью АСУ ТП энергоблока и должна быть унифицирована по аппаратной и программной части с общесистемными решениями по энергоблоку. Важнейшей составной частью СКУ-ВХР должна стать подсистема автоматического химического контроля АХК-ВХР. В основу подсистемы автоматического контроля качества водного теплоносителя АЭС с ВВЭР-СКД должны быть положены: использование опыта проектирования и эксплуатации аналогичных систем для одноконтурных систем (РБМК); применение непрерывного автоматического химического контроля параметров, используемых для управления процессом; выбор для контроля наиболее уязвимых для железооксидных отложений и солей элементов конструкции реакторной установки (твэлы, проточная часть турбины); выбор наиболее информативных параметров (на основе измерений электропроводности и рН, содержания кремниевой кислоты,

общего органического углерода, железа) для поддержания на заданном уровне качества водного теплоносителя при эксплуатации атомного энергоблока. Также система автоматического контроля должна учитывать новейшие апробированные разработки в данной области, использовать отечественные разработки методов и методик расчетного (косвенного) определения основных нормативных и диагностических показателей. В качестве приборного парка должны использоваться российские существующие или модернизированные кондуктометры на базе российского существующего или модернизированного приборного парка (измерение электропроводности, которая характеризует глубину обессоливания воды и возможность образования отложений на теплопередающих поверхностях) и рН-метры (характеризующие коррозионную активность воды) – наиболее надежные и широко используемые автоматические анализаторы. В качестве расчетной базы целесообразно использовать обобщенную математическую модель ионных равновесий и новый метод, основанный на измерениях электропроводности и рН охлажденных проб водного теплоносителя, разработанные на основе теории растворов электролитов в условиях ионных равновесий технологических водных сред [14]. Методы математического моделирования на основе измерений величины рН, удельной электропроводности прямой и Н-катионированной пробы позволяют расширить спектр функциональных возможностей СХТМ, раскрыть приборный потенциал и, следовательно, достаточно эффективно выявлять недостатки и быстротекущие нарушения ВХР [15]. Описанная система АХК разработана, внедрена и успешно эксплуатируется на Конаковской ГРЭС, Костромской ГРЭС, Ивановской ТЭЦ-3, ТЭЦ-9 Мосэнерго, третьем блоке Калининской АЭС и других объектах энергетики.

ВЫВОДЫ

Для эксплуатации в номинальном режиме главного контура инновационного атомного энергоблока на основе реакторной установки ВВЭР-СКД рекомендуется нейтральный бескоррекционный ВХР.

С целью снижения риска образования железоокисных отложений на теплопередающих поверхностях реактора и предотвращения заноса проточной части турбины целесообразно применить полнопоточное высокотемпературное обезжелезивание питательной воды.

При проектировании и создании пилотного образца ВВЭР-СКД следует предусмотреть возможность проведения анализа эффективности использования обезжелезивающих электромагнитных фильтров в условиях нейтрального ВХР и при проектных параметрах теплоносителя.

Естественно, что приведенные в статье соображения носят самый первый, предварительный характер. Для точного определения водно-химического режима реакторной установки ВВЭР-СКД требуются дополнительные исследования с получением детальных количественных характеристик.

Литература

1. Юрчевский Е.Б., Семишкин В.П., Кузнецов В.М., Чусов И.А., Кавун О.Ю., Шарый Н.В. О применении опыта тепловой и атомной энергетики для выбора водно-химического режима инновационной реакторной установки ВВЭР-СКД. Часть 1. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 57–72. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.05>
2. Юрчевский Е.Б., Чуркин А.Н., Семишкин В.П., Чусов И.А., Шарый Н.В., Кавун О.Ю. Водно-химический режим ВВЭР-СКД и основные системы его обеспечения. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2023. – Вып. 3. – С. 64–75.

3. Морозова И.К., Громова А.И., Герасимов В.В., Кучеряев В.А., Демидова В.В. Вынос и отложения продуктов коррозии реакторных материалов. – М.: Атомиздат, 1975. – 280 с.
4. Лузанова Л.М., Задонский Н.В., Швоев А.Ф. и др. Активированные продукты коррозии в главном циркуляционном контуре ВВЭР-1000. // Атомная энергия. – 1990. – Т. 68. – Вып. 1. – С. 52–54.
5. Гусев Б.А., Семенов В.Г., Ефимов А.А., Пинчук В.П. Поведение продуктов коррозии в первом контуре ЯЭУ с водным теплоносителем. // Вестник СПбГУ. – 2012. – Сер. 4. – Вып. 4. – С. 110–118.
6. Герасимов В.В. Коррозия реакторных материалов. М.: Издательство, 1980. – 256 с.
7. Дуб А.В., Рисованный В.Д. Разработка новых материалов и задачи реакторного материаловедения. Научная сессия «Наука для атомной энергетики», г. Обнинск, 7.06.2019. – 26 с.
8. Тяпков В.Ф., Шарафутдинов Р.Б. Состояние, основные проблемы и направления совершенствования водно-химического режима АЭС. // Водоочистка. – 2006. – № 11. – С. 33–41.
9. Брагин В.В., Коростелев Д.П., Мураков Ю.Б. и др. Промышленные испытания установок высокотемпературной очистки теплоносителя от продуктов коррозии. // Атомная энергия. – 1989. – Т. 67. – Вып. 1. – С. 23–28.
10. Гусев Б.А., Москвин Л.Н. Высокоградиентные магнитные фильтры для очистки водного теплоносителя от продуктов коррозии. // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. – 2019. – № 4. – С. 66–80.
11. Григоров В.В. Очистка жидких сред от нерастворенных радиоактивных примесей с помощью фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами. Кандидатская диссертация. – М., 2018.
12. Цырульников Д.Л., Юрчевский Е.Б., Белан Ф.И. и др. Результаты испытаний электромагнитного фильтра на втором контуре АЭС с ВВЭР-440. // Теплоэнергетика. – 1987. – № 4. – С. 34–37.
13. Юрчевский Е.Б., Шарый Н.В., Первов А.Г., Пичугина М.А. Ионообменная и обратноосмотическая технологии обессоливания воды для ТЭС и АЭС. // Тяжелое машиностроение. – 2015. – № 7–8. – С. 20–24.
14. Ларин Б.М., Ларин А.Б., Колегов А.В. Измерение электропроводности и рН в системах мониторинга водного режима ТЭС. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – 332 с.
15. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 472 с.

Поступила в редакцию 26.07.2024

Авторы

Юрчевский Евгений Борисович – д.т.н., профессор, главный специалист,

E-mail: aquachim@yandex.ru

Семишкин Валерий Павлович – д.т.н., зам. генерального конструктора по научной работе,

E-mail: semishkin@grpress.podolsk.ru

Чусов Игорь Александрович – д.т.н., профессор, главный специалист,

E-mail: igrch@mail.ru

Безруков Юрий Алексеевич – д.т.н., главный специалист,

E-mail: bezrukov@grpress.podolsk.ru

Кавун Олег Юрьевич – д.т.н., профессор, главный специалист,

E-mail: kavun_oleg@mail.ru

Шарый Николай Васильевич – д.т.н., главный специалист,

E-mail: nnsharyi@gmail.com

UDC 621.039.58

On Application of the Thermal and Nuclear Power Experience to Select Water Chemistry for the VVER-SKD Innovative Reactor Plant. Part 2

Yurchevsky E.B., Semishkin V.P., Chusov I.A., Bezrukov Yu.A., Kavun O.Yu., Sharyi N.V.

OKB Hidropress JSC,
21 Ordzhonikidze St., 142103 Podolsk, Russia**Abstract**

The second part of the study is devoted to the solution of several interrelated problems that define, in the long run, the serviceability of the VVER-SKD reactor plant and a number of auxiliary systems. It has been shown that, since corrosion and erosion were one of the key problems in the process of introducing fossil-fueled ACS steam turbine units, it is necessary to conduct additional bench and reactor tests of advanced steels. An analysis into the experience of operating the existing high-temperature purification systems at VVER-1000 and BN-600 power units gives ground to expect that installation of a high-temperature deferrization filter upstream of the VVER-SKD reactor will reduce the deposition of activated corrosion products on the heat transfer surfaces between the reactor and the turbine condenser, and, accordingly, the intensity of radiation effects on operating and maintenance personnel, and relieve ion-exchange filters of corrosion products and the radionuclides they have absorbed when the power unit operating mode changes. It has been shown that the developed technology for liquid media purification using filtering elements with nanostructured membranes has not been adequately justified and experimentally confirmed. The paper shows that ion-exchange or membrane technologies should be used to demineralize make-up water. The key conclusions to be made from the study are as follows: a neutral correction-free water chemistry is recommended for operation in the nominal mode of the VVER-SKD based innovative power unit's main circuit; in order to reduce the risk of the iron oxide deposit formation on the reactor's heat transfer surfaces and prevent the turbine flow area choking, it is reasonable to use full-flow high-temperature deferrization of feedwater; a possibility needs to be provided in the process of designing and building a VVER-SKD prototype for analyzing the efficiency of using deferrization electromagnetic filters in the neutral water chemistry conditions and with the design coolant parameters.

Keywords: high-temperature deferrization filter, desalination, direct-flow, steam turbine, nanostructured membranes, electromagnetic filter, deferrization, water chemistry.

For citation: Yurchevsky E.B., Semishkin V.P., Chusov I.A., Bezrukov Yu.A., Kavun O.Yu., Sharyi N.V. On Application of the Thermal and Nuclear Power Experience to Select Water Chemistry for the VVER-SKD Innovative Reactor Plant. Part 2. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2024, no. 3, pp. 81–94; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.07> (in Russian).

References

1. Yurchevsky E.B., Semishkin V.P., Kuznetsov V.M., Chusov I.A., Kavun O.Yu., Sharyi N.V. On Application of Thermal and Nuclear Power Engineering Experience for Selection of Water-Chemical Regime of the Innovative Reactor Plant VVER-SKD. Part 1. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 3, pp. 57–72. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.05> (in Russian).
2. Yurchevskiy E.B., Churkin A.N., Semishkin V.P., Chusov I.A., Shary N.V., Kavun O.Yu. Water-chemical regime of VVER-SCD and main systems of its maintenance. *Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors*, 2023, issue 3, pp. 64–75 (in Russian).

3. Morozova I.K., Gromova A.I., Gerasimov V.V., Kucheryaev V.A., Demidova V.V. *Removal and Deposition of Corrosion Products of Reactor Materials*. Moscow, Atomizdat, 1975, 280 p. (in Russian).
4. Luzanova L.M., Zadonsky N.V., Shvoev A.F., Piskun A.S., Zubkov O. S., Teplova G. N. Activated corrosion products in the primary circuit (Circulation-Loop) of a VVER-1000 reactor. *Atomic Energy*, 1990, vol. 68, iss. 1, pp. 68–72. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02069727>
5. Gusev B.A., Semenov V.G., Efimov A.A., Panchuk V.V. Behavior of corrosion products in the primary circuit of nuclear power plants with water coolant. *Vestnik of St. Petersburg State University*, 2012, ser. 4, iss. 4, pp. 110–118 (in Russian).
6. Gerasimov V.V. *Corrosion of reactor materials*. Moscow, 1980, 256 p. (in Russian).
7. Dub A.V., Risovanyi V.D. Development of New Materials and Tasks of Reactor Materials Science. *Scientific session «Science for Nuclear Power Engineering»*. Obninsk, 2019, 26 p. (in Russian).
8. Tyapkov V.F., Sharafutdinov R.B. Status, main problems and directions for improving the water-chemical regime of nuclear power plants. *Water treatment (Vodoochistka)*, 2006, no. 11, pp. 33–41 (in Russian).
9. Bragin V.B., Korostelev D.P., Murakov Yu.B., Neshkov P.F., Orlov A.K., Prokhorov N.A., Tret'yakov S.Ya., Famintsyn A.M., Tsekh A.R., Sharygin L.M. Commercial testing of a unit for high-temperature removal of corrosion products from water coolant. *Atomic energy*, 1989, vol. 67, iss.1, pp. 515–522. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01126391>
10. Gusev B.A., Moskvina L.N. High-gradient magnetic filters for water coolant purification from corrosion products. *NPS Life Cycle Assurance Technologies*, 2019, no 4, pp. 66–80 (in Russian).
11. Grigorov B.V. Purification of liquid media from undissolved radioactive impurities by means of filtering elements with nanostructured membranes. Cand. Diss. (Engineering), Moscow, 2018 (in Russian).
12. Tsyrlunikov D.L., Yurchevsky E.B., Belan F.I. Test results of the electromagnetic filter on the second circuit of NPP with VVER-440. *Thermal Engineering*, 1987, no. 4, pp. 34–37 (in Russian).
13. Yurchevskiy E.B., Shary N.V., Pervov A.G., Pichugina M.A. Ion-exchange and reverse osmosis technology of water desalination for TPP and NPP. *Heavy Engineering*, 2015, no. 7–8, pp. 19–22 (in Russian).
14. Larin B.M., Larin A.B., Kolegov A.V. *Measurement of electrical conductivity and pH in TPP water regime monitoring systems*. Ivanovo, IHEU Publ., 2014, 332 p. (in Russian).
15. Petukhov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A. *Heat exchange in nuclear power installations*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 472 p. (in Russian).

Authors

Evgeny B. Yurchevsky, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Specialist,

E-mail: aquachim@yandex.ru

Valery P. Semishkin, Dr. Sci. (Engineering), Deputy General Designer for Scientific Work,

E-mail: semishkin@grpress.podolsk.ru

Igor A. Chusov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Specialist,

E-mail: igrch@mail.ru

Yuri A. Bezrukov, Dr. Sci. (Engineering), Chief Specialist,

E-mail: bezrukov@grpress.podolsk.ru

Oleg Yu. Kavun, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Specialist,

E-mail: kavun_oleg@mail.ru

Nikolay V. Sharyi, Dr. Sci. (Engineering), Chief Specialist,

E-mail: nnsharyi@gmail.com