

Программная инженерия



Пр **8**
2014
ИН

В. А. Федотов^{1, 2}, аспирант, руководитель группы системного обслуживания ИВЦ, e-mail: workstudio@yandex.ru,

О. М. Гулина¹, д-р техн. наук, проф., e-mail: olga@iate.obninsk.ru,

¹Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" Обнинский институт атомной энергетики,

²Приборный завод "Сигнал", г. Обнинск

Разработка системы поддержки принятия решений по прогнозированию ресурса оборудования АЭС в условиях эрозионно-коррозионного износа

Рассмотрены вопросы создания отечественной автоматизированной системы, способной решать задачи сбора информации о режиме эксплуатации и для прогнозирования остаточного (гарантирующего неразрушение в заданном временном интервале) ресурса оборудования АЭС, работающего в условиях эрозионно-коррозионного износа. Представленная система поддержки принятия решений охватывает заданный жизненный цикл критического оборудования и с помощью структурированного интерфейса предоставляет персоналу актуальную базу знаний о состоянии оборудования, что позволяет оптимально планировать профилактические и ремонтные работы.

Ключевые слова: автоматизированная система, атомная электростанция, база данных, ГОСТ, интерфейс, жизненный цикл, трубопровод, эрозионно-коррозионный износ

Введение

Обеспечение безопасной и надежной работы АЭС в целом и отдельных элементов ее оборудования в процессе эксплуатации является важной инженерной и научной задачей. Оборудование и трубопроводные системы энергоблоков второго контура, изготовленные из углеродистых сталей, подвержены воздействию процесса эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ). В результате такого износа повышается вероятность размывов элементов трубопроводов, особенно тех, где действует турбулентный поток среды, что может привести к недопустимым уменьшениям толщины стенок трубопроводов (утонениям) или даже к их разрывам. Повреждения вследствие ЭКИ могут вызвать неплановый останов энергоблока и тем самым существенно повлиять на качество, стоимость и безопасность работы всей станции. В связи с этим обстоятельством остро стоит вопрос предотвращения такого рода аварий. Для этого необходимы эффективная методика мониторинга технического состояния и модель прогнозирования срока службы элементов оборудования и трубопроводов.

Актуальность рассматриваемой тематики обусловлена потребностью отрасли добиваться экономически эффективного результата и приемлемого уровня безопасности АЭС, применяя такие сбалансированные и оптимальные решения, при реализации которых требования безопасности вырабатываются с помощью

системного процесса, использующего качественные и количественные результаты детерминистического и вероятностного анализов (риск-информативный подход). Для проведения такого расчета необходимо наличие прослеживаемого и регулярно пополняемого исторического машиночитаемого материала об эксплуатационных характеристиках оборудования и трубопроводов АЭС, находящихся в агрессивной среде и подверженных разрушительным воздействиям процесса ЭКИ. Прогнозирование безаварийного периода эксплуатации с помощью эмпирических моделей расчетов или на основе результатов неразрушающего контроля должно обеспечить "разумную" консервативность расчетов [1].

Постановка задачи

Модели прогнозирования остаточного ресурса в условиях ЭКИ. В исследованиях в области неразрушающего контроля под остаточным рабочим ресурсом понимается время, отсчитываемое от начала проведения работ по определению фактического технического состояния трубопровода (диагностики) до того момента, когда считается, что трубопровод исчерпал свой рабочий ресурс. Опыт решения отмеченной выше задачи в разных странах показывает, что существуют два основных направления определения остаточного ресурса трубопроводов: прогнозирование на основе расчета

скорости ЭКИ на базе эмпирических моделей и прогнозирование на основе обработки данных системы контроля (мониторинга) состояния оборудования.

Первое направление заключается в построении динамических многофакторных зависимостей, учитывающих влияние теплогидравлических, конструкционных и эксплуатационных параметров на интенсивность процесса ЭКИ. Второе направление предполагает оценку скорости ЭКИ по результатам замеров толщины стенки трубопровода в течение определенного промежутка времени [2, 3].

Для построения динамических многофакторных зависимостей необходима нормативно-справочная информация о материале, типе и конструкции элемента оборудования, а также справочные данные, полученные на основе лабораторных исследований и опыта эксплуатации. Во втором случае необходимо обеспечить хранение и автоматизированную обработку данных замеров толщин стенок в течение эксплуатации оборудования.

Очевидно, что эффективность расчетов и в первом, и во втором случаях напрямую зависит от наличия тщательно спланированной и регулярно пополняемой базы данных (БД) [4].

Нормативная база. В целях решения задачи контроля и определения остаточного технического ресурса оборудования проводится актуализация нормативной документации. В 2012 г. в отрасли утверждена последняя редакция руководящего документа (РД) эксплуатирующей организации (ЭО) ВНИИ АЭС (РД ЭО 1.1.2.11.0571—2010) "Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе" [5]. В данном документе впервые описывается не только методика расчета допустимой толщины стенок элементов трубопроводов, подверженных ЭКИ, но и устанавливается однозначная связь этих процессов со стадиями жизненного цикла всей атомной станции. Кроме этого, РД определяет также требования к размещению информации в информационной БД станции, среди которых основными можно назвать следующее:

- сведения о марке металла, физико-химических и водно-химических свойствах;
- рабочие параметры (среда, давление, температура, скорость среды, концентрация активных веществ);
- данные эксплуатационного контроля толщин стенок трубопровода (толщинометрии);
- сведения обо всех проводимых работах на элементах трубопровода.

Помимо расширения области применения РД, при определении допустимых толщин стенок элементов трубопроводов (утолнений) в миллиметрах относительно расчетного номинала), необходимо обеспечить автоматизированную оценку требуемых характеристик также для элементов, отличных от содержащихся в РД типоразмеров и условий их эксплуатации. Такого рода инструментарий необходим при оценке остаточного ресурса.

Теория и практика. На каждой АЭС разработаны и применяются в целом очень похожие методики регламентного контроля толщин стенок элементов трубопроводов. Результаты таких замеров фиксируются на каждой АЭС в специальных журналах, преимущественно на бумажных носителях. В результате сложилась система принятия решений, разорванная в нескольких местах участием в ней человека и несвязанная между собой цифровыми интерфейсами, что приводит к росту издержек в работе персонала. А самое главное, сегодня нет машиночитаемой БД, которая необходима для качественного анализа и прогнозирования ресурса оборудования. Иными словами, нет аккумулированного материала по истории эксплуатации с учетом всех замеров, работ по ремонту и изменений параметров рабочей среды. Как следствие, сложно не только делать прогнозы на короткую перспективу для конкретного оборудования, но и говорить об оптимизации процесса контроля остаточного ресурса.

Разработанный за рубежом программный комплекс (система) СНЕС (версия 1.0 выпущена EPRI в июле 1987 г., а в 1989 г. — версия 2.0, коммерческая) предназначался для расчета скорости ЭКИ в трубопроводах с однофазной средой [6]. При его разработке были использованы данные лабораторных исследований, которые проводились в Англии, Франции и США с 1970 г. и в Германии с 1973 г., а также данные эксплуатационного контроля на реальных АЭС. Программный комплекс СНЕСWORKS был разработан в 1995 г. для того чтобы обеспечить возможность работы с вычислительной техникой в операционной среде Windows. Комплекс СНЕСWORKS интегрирует и включает функции СНЕС, СНЕС-Т, СНЕС-NDE и СНЕСМАТЕ. Основной задачей комплекса СНЕСWORKS является расчет скорости ЭКИ и определение длительности эксплуатации трубопроводов на основе эмпирической модели, что позволяет повысить безопасность эксплуатации, оптимизировать периоды ремонта, а также уменьшить необходимое число контрольных замеров при планово-предупредительных работах. Высокая стоимость этих систем, а также необходимость их адаптации к условиям российских АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) и реактором большой мощности канальным (РБМК) выдвигают требования о создании отечественных систем, позволяющих решать аналогичные задачи [7].

Существующие и аттестованные отечественные программные средства успешно решают задачи расчета скорости ЭКИ и прогнозирования износа (ЭКИ-02 для однофазной среды на АЭС с ВВЭР-440 и ЭКИ-03 для двухфазной среды на АЭС с ВВЭР-440, аналогичные программному комплексу СНЕСWORKS). Однако они не аккумулируют результаты таких расчетов, которые остаются результатами разового использования. Эта ситуация не позволяет персоналу АЭС отказаться от ручного ввода исходных данных и фиксации выходных значений с помощью бумажных и/или

электронных журналов произвольного формата [8]. Кроме упомянутых действий каждый этап занесения и обработки информации выполняется разрозненными программными решениями, что в итоге не дает возможности свести всю информацию об оборудовании и проведенных замерах к единой БД. Наличие же такой БД существенно повысило бы точность и производительность обработки результатов при расчете скорости процесса ЭКИ и определении остаточного ресурса оборудования трубопроводов.

Таким образом, с учетом требований РД ЭО 1.1.2.11.0571—2010 и реальных потребностей отрасли очевидна необходимость создания для технического персонала АЭС качественного аналитического программного решения, которое будет учитывать специфику отечественных типов реакторов и проводить сопровождение всего жизненного цикла оборудования с использованием единой и пополняемой БД [7]. По этой причине в качестве стратегического направления разработки выбран путь создания жестко структурированной автоматизированной системы, отвечающей всем необходимым техническим, системным и эргономическим требованиям к ней. Такая система должна в комплексе решать обозначенные выше задачи в режиме "одного окна".

Основные принципы. При создании и последующем сопровождении такой системы за основу выбраны риск-информативный и процессный подходы. Согласно последнему, главным выделяется цельный и неделимый горизонтальный процесс (жизненный цикл указанного оборудования), протекающий сквозным образом через зоны ответственности структур вертикального уровня (департаменты, отделы, лаборатории и т. д.), ответственные за мониторинг и поддержания остаточного ресурса на проектном уровне.

При этом важно не просто объединить в единое целое различные виды эксплуатационной информа-

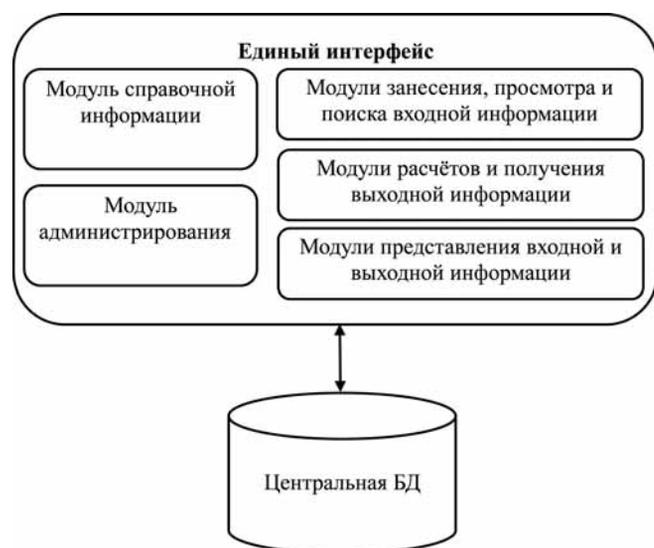


Рис. 1. Структурная схема системы

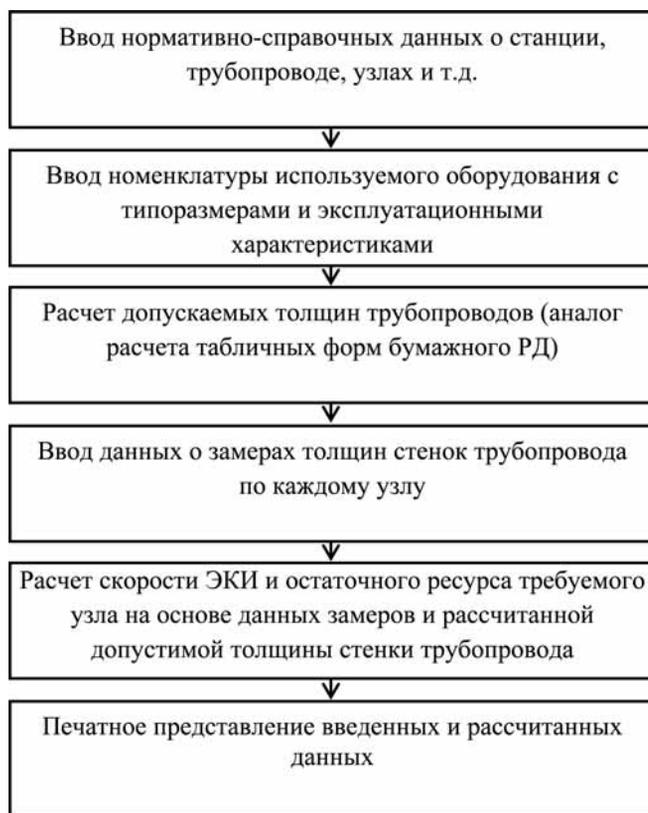


Рис. 2. Жизненный цикл информации в системе

ции и методик расчетов (рис. 1). Ключевым результатом всех работ в системе должна стать реализация обоснованной методики расчета скорости ЭКИ по накопленным данным замеров и последующее прогнозирование остаточного ресурса оборудования, подверженного ЭКИ. На рис. 2 показана последовательность ввода и обработки информации в системе.

Основными функциональными требованиями к системе являются: наличие пользовательского интерфейса, осуществляющего ввод и просмотр информации о замерах; предоставление математического аппарата для достоверного расчета скорости ЭКИ и остаточного ресурса оборудования; размещение всего набора обрабатываемой информации в защищенной центральной базе данных. Кроме перечисленных выше требований, как потенциально конкурентоспособный промышленный образец, система должна быть реализована в виде единого, хорошо оформленного и функционально продуманного программного продукта. Этот продукт должен поддерживать богатый набор нормативно-справочной информации, учитывающей максимально возможное число видов объектов и оборудования, а также быть готовым к его государственной сертификации и патентной регистрации, что позволит не только вывести его на IT-рынок, но и обеспечить конкуренцию с зарубежными аналогами.

Реализация

Методика разработки программной системы. Проект технического задания на автоматизированную систему предъявляет требования по организации реляционной структуры таблиц в БД под управлением СУБД типа Oracle или MS SQL Server, а также по разработке многопользовательского оконного интерфейса с возможностью управления информацией на основе прав доступа. Однако движение в этом направлении на этапе исследования могло существенно увеличить сроки проведения работ, так как было бы сложно гарантировать должный уровень достоверности результатов конечного моделирования. Более того, применение СУБД промышленного типа на ранней стадии разработки затруднило бы автономность работы системы при демонстрации предлагаемых решений на локальной рабочей станции (переносном компьютере).

В результате более детальной оценки перечисленных выше рисков была применена методика ускоренной разработки. Такой подход позволил не отказываясь от базовых положений проекта технического задания "вынести" результаты проведенной работы из стадии закрытого исследования на этап реального тестирования полученных промежуточных решений всеми заинтересованными специалистами.

Концептуальная схема БД была возвращена с использованием СУБД MS Access, где по правилам реляционной модели были созданы таблицы нормативно-справочных данных (марки сталей, типоразмеры трубопроводов, схемы измерений, сотрудники и т. д.), таблицы мастер-данных об объекте эксплуатации (атомные станции, трубопроводные системы и составляющие их элементы)

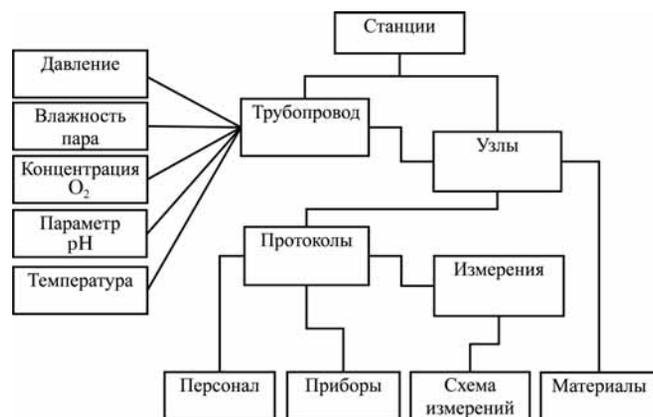


Рис. 3. Обобщенная схема базы данных

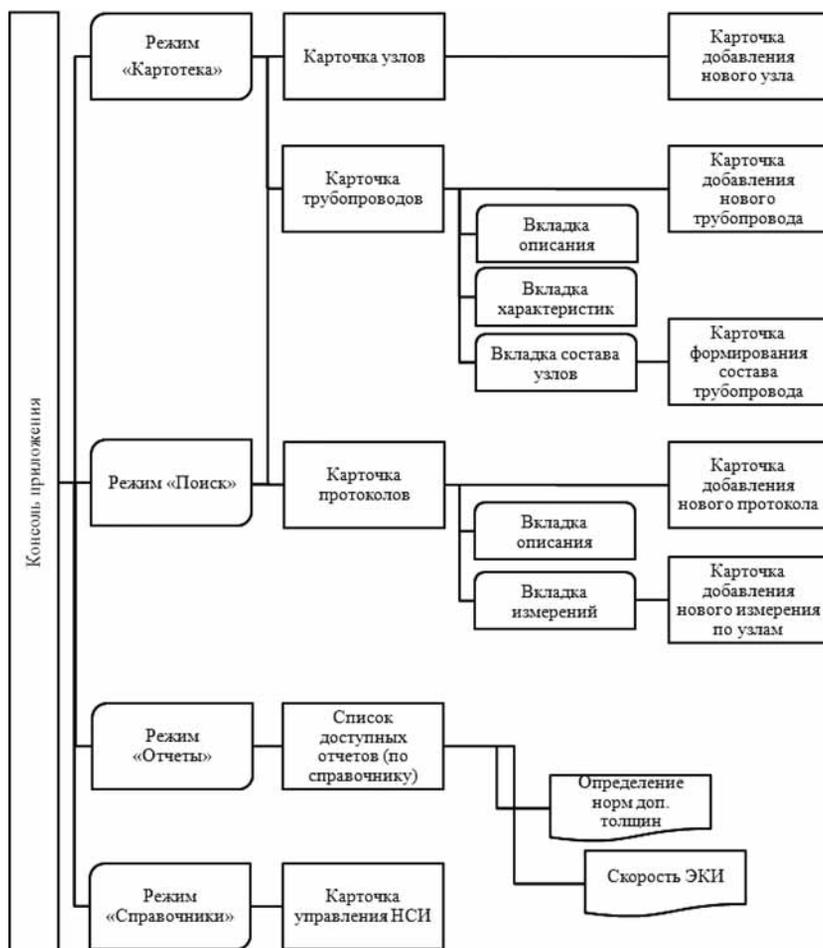


Рис. 4. Структурная схема интерфейса пользователя

и таблицы фиксации результатов контроля толщин стенок элементов трубопроводов (рис. 3).

Тестовая модель пользовательского интерфейса ("толстый" клиент) разработана в среде объектно-ориентированного языка программирования Visual Basic и представляет собой набор форм в составе главного окна — консоли приложения (рис. 4).

Консоль приложения — это основная функциональная оболочка, которая предоставляет возможность просмотра и редактирования информации посредством персональных карточек — "узлов (элементов)", "трубопроводов" и "протоколов замеров". Помимо этого реализован доступ к получению отчетной информации и управлению нормативно-справочной информацией (НСИ) в рамках станции.

При этом в исходном коде интерфейса связь с данными уже сейчас реализована через универсальный механизм, что позволит провести последующий перенос данных в сетевые СУБД (Oracle MS или SQL Server) без перепрограммирования интерфейса. Для успешной инсталляции программы на компьютере пользователя создан автоматизированный пакет в среде конструктора дистрибутивов Install Shield.

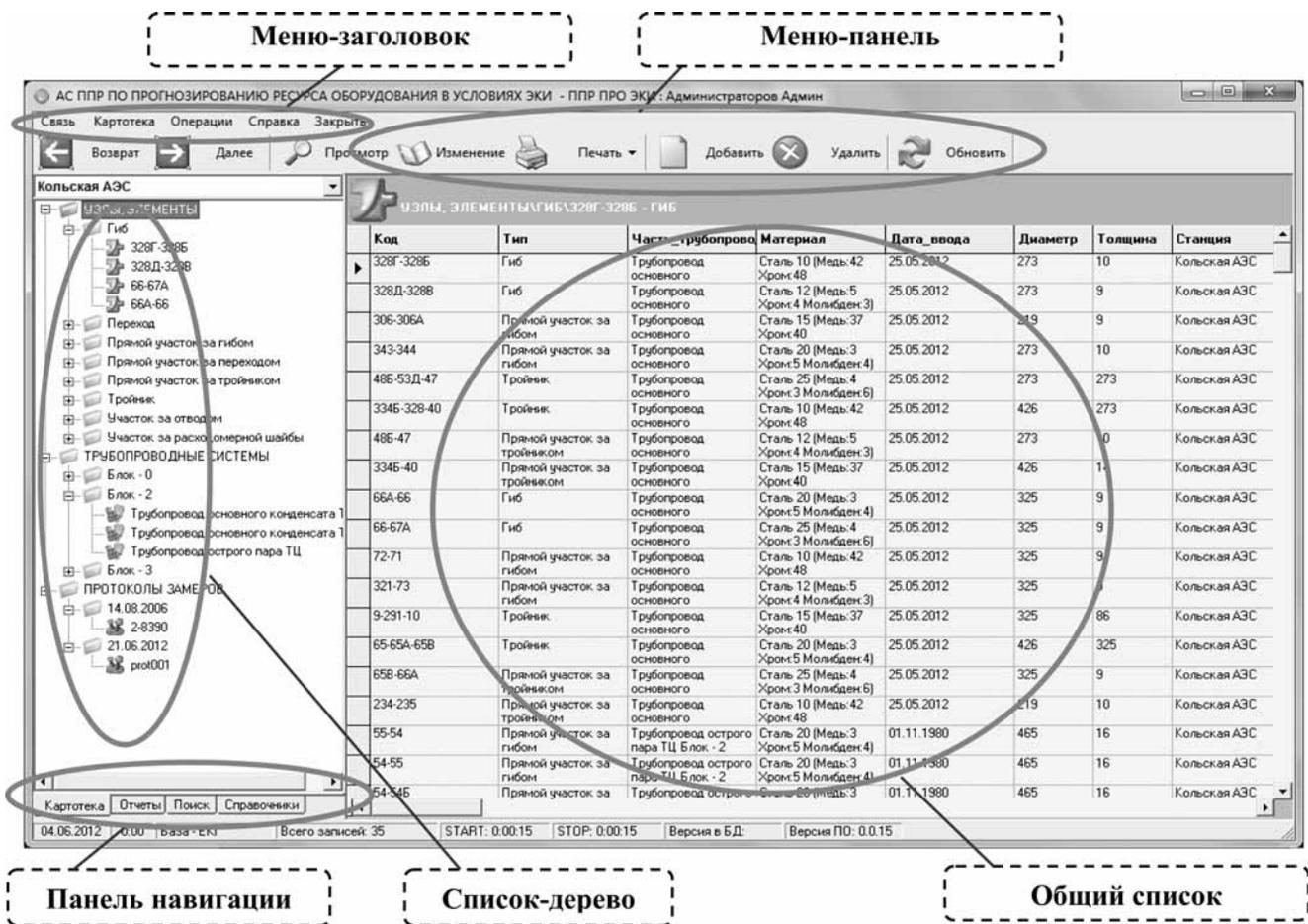


Рис. 5. Главная консоль приложения в режиме "Картотека"

Консоль приложения — это головной модуль приложения. Общий принцип работы всей программы и консоли приложения (рис. 5) построен по иерархическому принципу доступа к информации, где на каждом следующем уровне происходит увеличение детализации данных, что в конце концов приводит к возможности модификации содержимого.

Персональные карточки открывают информацию для детального изучения и/или редактирования в индивидуальной карточке, соответствующей определенной категории информации (рис. 6). Введена классификация и реализованы следующие отдельные карточки:

- для составных узлов (элементов) трубопровода АЭС;
- для трубопроводов АЭС, состоящих из узлов (элементов);
- для протоколов замеров, где заполняются данные эксплуатационного контроля по каждому узлу (элементу).

Сначала в карточку узлов заносится информация об используемых на АЭС узлах (элементах), после чего в карточке трубопроводов из БД выбираются составные узлы для данного трубопровода.

В карточку протоколов вначале вносится информация о конкретном протоколе, затем выбираются доступные в БД узлы (элементы), по которым осуществляется заполнение результатов замеров толщин стенок.

Функция **формирования электронного протокола** является необходимой функцией обратной связи системы, предоставляющей возможность формирования и печати электронного документа в виде исходного бумажного варианта протокола замеров.

Функция **программного определения допустимых толщин трубопроводов** осуществляет автоматизированный расчет допустимых толщин трубопроводов. При этом в последующих расчетах скорости ЭКИ и остаточного ресурса можно уже не выбирать ручную табличные данные из печатного варианта РД, а проводить оперативный расчет допустимых толщин по реальным теплогидравлическим и режимным параметрам, прочностным свойствам материалов и конструктивным особенностям рассматриваемого узла, уже имеющимся в БД системы.

Методология определения допустимой толщины стенки трубопровода базируется на РД ЭО 1.1.2.11.0571—2010. Для каждого типа элементов ре-

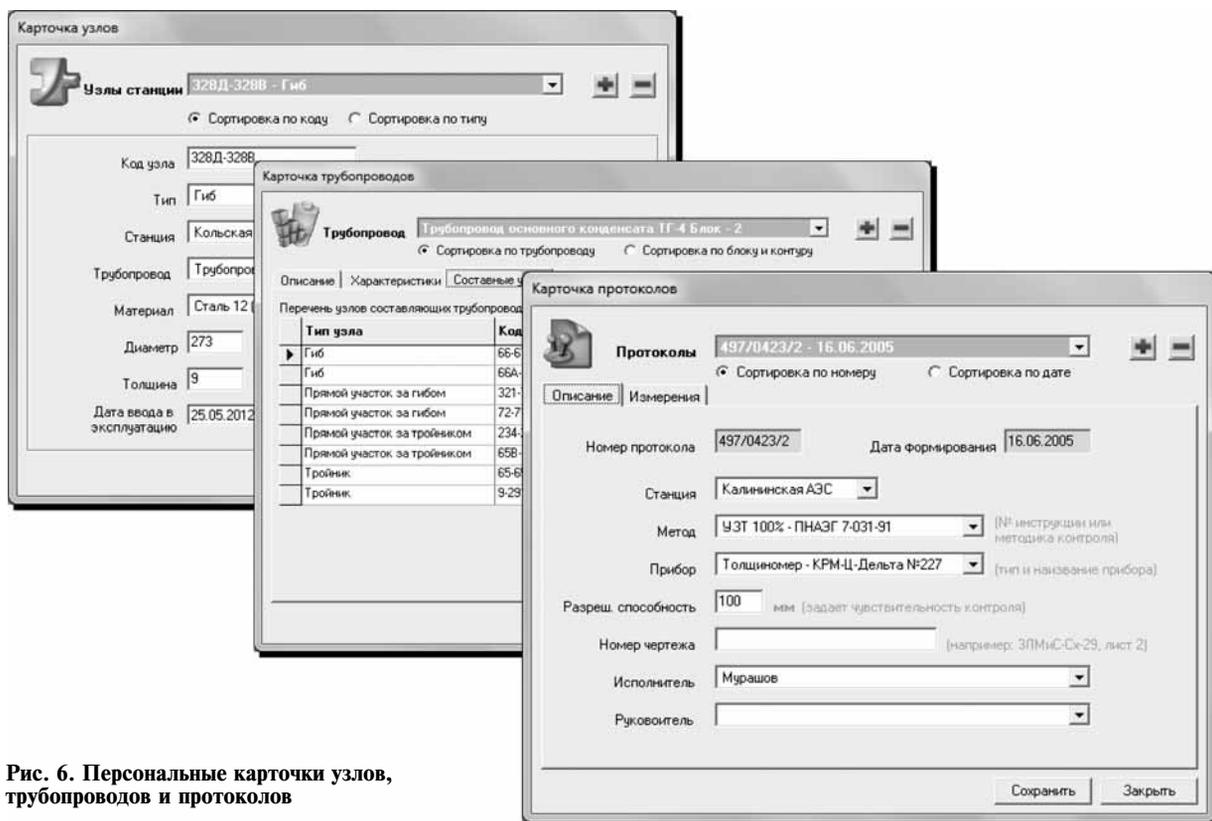


Рис. 6. Персональные карточки узлов, трубопроводов и протоколов

лизуется своя методика расчетов, где допустимая толщина S_{RT} выбирается из условия

$$S_{RT} = \max\{ (S_{RT}^* + 0,2), (0,5S_{НОМ} + 0,2) \},$$

где $S_{НОМ}$ — номинальное значение толщины стенки, мм; S_{RT}^* — расчетная толщина стенки, мм, по условию прочности. Например, для прямолинейного участка трубопровода, нагруженного внутренним давлением, S_{RT}^* определяется как

$$S_{RT}^* = \frac{pD_a}{2\varphi_T[\sigma] + p},$$

где D_a — наружный диаметр трубопровода, мм; φ_T — расчетный коэффициент снижения прочности для прямого участка трубопровода, рекомендуемое значение $\varphi_T = 1$; p — рабочее внутреннее давление, МПа; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение, МПа.

Основной функцией представленного расчета является последующее определение остаточного ресурса, чего нельзя сделать без нахождения допустимой толщины стенки трубопровода для каждого элемента.

Функция **программного определения скорости ЭКИ и остаточного ресурса** основана на методе первичной обработки, целью которого является определение поврежденных участков трубопроводов [9]. Расчет скорости ЭКИ при этом проводится по данным, введенным из протоколов контроля (рис. 7), а расчет оста-

точного ресурса учитывает еще и предварительно рассчитанные данные о допустимых толщинах стенок трубопроводов по каждому элементу трубопровода.

Скорость ЭКИ вычисляется по следующей формуле:

$$W_{ЭКИ} = \frac{\Delta S}{T_{ЭКСПЛ}} = \frac{S_{НОМ} - S_{\min}}{T_{ЭКСПЛ}},$$

где $S_{НОМ}$ — номинальное значение толщины стенки, мм; S_{\min} — минимальное значение толщины стенки, мм; $T_{ЭКСПЛ}$ — время эксплуатации оборудования, годы.



Рис. 7. Методика расчета скорости ЭКИ и остаточного ресурса

В свою очередь, остаточный ресурс определяется по следующей формуле:

$$T_{\text{ост}} = \frac{\Delta S_{\text{доп}}}{W_{\text{ЭКИ}}} = \frac{S_{\text{ном}} - S_{\text{мин}}}{W_{\text{ЭКИ}}},$$

где $S_{\text{доп}}$ — допустимое значение толщины стенки, мм; $\Delta S_{\text{доп}}$ — допустимое отклонение относительно номинального значения, мм; $W_{\text{ЭКИ}}$ — скорость ЭКИ (мм/год).

Согласно рассматриваемой методике поврежденным считается такой участок трубопровода, у которого толщина стенки меньше номинала; критическим элементом — такой элемент, у которого толщина стенки меньше допускаемой или ожидается, что толщина меньше допускаемой будет достигнута до даты следующего контроля.

При эксплуатации трубопроводов коррозионные повреждения не должны превышать нормируемые значения. Поэтому приоритет в выборе участков для следующего контроля определяется на основе учета скорости ЭКИ. Таким образом, выявляются наиболее опасные участки, которым следует уделить повышенное внимание при контроле остаточного ресурса трубопроводов АЭС [10]. По этой причине для того чтобы используемые в составе автоматизированной системы процедуры были легитимны (сертифицированы), необходим документ, регламентирующий расчет скорости ЭКИ по данным контроля. Аналогичные требования должны быть предъявлены к верификации программных средств, используемых для прогнозирования скорости ЭКИ элементов трубопроводов по параметрам, отражающим состояние их эксплуатации.

В настоящее время на стадии подготовки находится этап регистрации авторских прав коллектива разработчиков на исходный компьютерный код программ для ЭВМ (программный комплекс и БД). Далее, по ожидаемой утверждения в отрасли методике будет проходить верификация программной реализации математического алгоритма расчета, а затем сертификация всего программного комплекса как коммерческого продукта.

Заключение

Основными результатами исследований, представленных в настоящей статье, являются выявление и обобщение максимального числа объектов, факторов, характеристик и методик, участвующих в формировании единого информационного поля, описывающего жизненный цикл заданного типа оборудования трубопроводов АЭС. Такая система поддержки принятия решений, отвечающая всем необходимым требовани-

ям, необходима ответственному персоналу АЭС для ведения комплексного учета собранных данных мониторинга по толщинометрии трубопроводов и при разработке рабочих программ по дальнейшему контролю. В результате выбрано направление на создание комплексной автоматизированной системы, основанной на едином понятийном и алгоритмическом аппарате.

Получена работоспособная модель пользовательского интерфейса для внесения и редактирования данных контроля элементов трубопроводов, центральная база данных с массивом предзаполненных нормативно-справочных данных, а также реализованы математические модели для расчета допустимых толщин трубопроводов, прогнозирования скорости процесса ЭКИ и определения остаточного ресурса его элементов.

Список литературы

1. Пономаренко Г. Л., Рыжов С. Б., Быков М. А., Ермаков Д. Н. Новый концептуальный подход к определению минимально достаточной эффективности аварийной защиты ВВЭР // Научно-технический сборник ВАНТ, серия "Обеспечение безопасности АЭС". Реакторные установки с ВВЭР. 2006. Вып. 13. С. 27—41.
2. Королев А. В., Кравченко В. П. Сравнительный анализ двух подходов к прогнозированию эрозионно-коррозионного износа трубопроводов АЭС // Труды Одесского гос. политехн. ун-та. 2001. Вып. 3 (12). С. 55—56.
3. Kastner W., Hofmann P., Nopper H. Erosionskorrosion in Kraftwerksanlagen — Entscheidungshilfe fuer Massnahmen zur Schadensvermeidung // VGB Kraftwerkstechnik. 1990. B. 70, heft 11. P. 939—948.
4. Буртаев Ю. Ф., Острейковский В. А. Статистический анализ надежности объектов по ограниченной информации. М.: Энергоатомиздат, 1995.
5. РД ЭО 1.1.2.11.0571—2010. Нормы допустимых толщин элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе атомных станций. М.: ОАО "Концерн Росэнергоатом", введен в действие с 29 октября 2012 г.
6. Chexal V. K., Dietrich E. B., Horowitz J. S. et al. CHES (Chexal-Horowitz-Erosion-Corrosion) Computer Program User's Manual. NSAC-112. Electrical Power Research Institute, Palo Alto, CA, Final Report. February 1988.
7. Гулина О. М., Бараненко В. И. О прогнозировании длительности эксплуатации элементов трубопроводных систем АЭС, подверженных эрозионно-коррозионному износу // Сб. ВНИИАЭС "Основные работы, выполненные в 2011 г." М.: ВНИИАЭС, 2012. С. 81—93.
8. Гулина О. М., Бараненко В. И., Просвирнов А. А., и др. Разработка программных средств и нормативной документации по эрозионно-коррозионному износу на АЭС // Теплоэнергетика. 2012. № 5. С. 34—39.
9. Бараненко В. И., Янченко Ю. А., Гулина О. М., Тарасова О. С. Эксплуатационный контроль трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу // Теплоэнергетика. 2009. № 5. С. 20—27.
10. Бараненко В. И., Янченко Ю. А., Гулина О. М., Докукин Д. А. О расчете скорости эрозионно-коррозионного износа и остаточного ресурса трубопроводов АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2010. № 2. С. 55—63.

V. A. Fedotov^{1, 2}, Postgraduate Student, System Maintenance Team Leader of the IT department, e-mail: workstudio@yandex.ru,

O. M. Gulina², Professor, e-mail: olga@iate.obninsk.ru

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) Institute of Nuclear Power Engineering, Obninsk

²JSC "Instrumental plant "Signal", Obninsk

Development of Decision Support System on the Prediction of the Life of NPP Equipment under Erosion-Corrosion Conditions

Ensuring of safe and reliable operation of nuclear power plants equipment must be based on making decisions on risk management throughout its life cycle.

The pipeline system of power units, working in conditions of flow-accelerated corrosion (FAC), significantly affects the quality, cost and safety of the nuclear power station in whole.

On this point reliable and long-term practice of observations, as well as application of sophisticated mathematical methods of forecasting, based on physical or empirical models of the investigated process is important.

In this regard there is an urgent need for creation of Russian analytical software with a common structured database of performance characteristics conducting reliable calculation of FAC process intensity as well as determining the residual life of equipment elements.

Such computer system should not concede to analogues in the possibilities of ergonomics and process orientation, but should take into account the specifics of Russian nuclear industry and experience of research in the field of designing analytical models for the prediction of the equipment life.

The article is devoted to the description of scientific and practical researches on creation of decision support system on the management of the life of NPP equipment.

The test model of the application solves the tasks of regular pipes wall thickness control data collection and storage mathematical prediction of the FAC speed and determination of residual life of nuclear power plant pipelines elements.

The system is intended primarily for the personnel of the nuclear power station, so it is developed with use of modern algorithmic and software tools to ensure a safe and comfortable work with a common database in the mode of "one window".

Keywords: *automated system, nuclear power plant, data base, standard, interface, lifetime, piping, flow-accelerated corrosion*

References

1. Ponomarenko G. L., Ryzhov S. B., Bykov M. A., Yermakov D. N. Novy konceptualny podhod k opredeleniyu minimalno dostatochnoy effektivnosti avariynoy zashchity VVER. *Nauchno-tehnichesky sbornik VANT, seriya "Obespechenie bezopasnosti AES". Reaktornye ustanovki s VVER*. 2006. N. 13. P. 27–41.
2. Korolev A. V., Kravchenko V. P. Sravnitelny analiz dvuh podhodov k prognozirovaniyu erozionno-korroziionnogo iznosa truboprovodov AES. *Trudy Odesskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta*. 2001. N. 3 (12). P. 55–56.
3. Kastner W., Hofmann P., Nopper H. Erosionskorrosion in Kraftwerksanlagen — Entscheidungshilfe fuer Massnahmen zur Schadensvermeidung. *VGB Kraftwerkstechnik*. 1990. B. 70, heft 11. P. 939–948.
4. Burtaev Y. F., Ostreikovskiy V. A. *Statistichesky analiz nadezhnosti ob'ektov po ogranichennoy informatsii*. M.: Energoatomizdat, 1995.
5. RD EO 1.1.2.11.0571—2010. Normy dopustimyh tolshchin elementov truboprovodov iz ughlerodistykh staley pri erozionno-korroziionnom iznose. M.: OAO "Kontsern Rosenergoatom", vveden v deistvie s 29 oktyabrya 2012.
6. Chexal V. K., Dietrich E. B., Horowitz J. S., et al. CHEC (Chexal-Horowitz-Erosion-Corrosion) Computer Program User's Manual, NSAC-112, Electrical Power Research Institute, Palo Alto, CA, Final Report, February 1988.
7. Gulina O. M., Baranenko V. I. O prognozirovanii dlitelnosti ekspluatatsii elementov truboprovodnyh sistem AES, podverzhennyh erozionno-korroziionnomu iznosu. *Sb. VNIIAES "Osnovnye raboty, vypolnennye v 2011"* M.: VNIIAES, 2012. P. 81–93.
8. Gulina O. M., Baranenko V. I., Prosvirnov A. A. etc. Razrabotka programmnyh sredstv i normativnoy dokumentatsii po jerozionno-korroziionnomu iznosu na AES. *Tepljoenergetika*. 2012. N. 5. P. 34–39.
9. Baranenko V. I., Yanchenko Y. A., Gulina O. M., Tarasova O. S. Ekspluatatsionny kontrol truboprovodov, podverzhennyh erozionno-korroziionnomu iznosu. *Tepljoenergetika*. 2009. N. 5. P. 20–27.
10. Baranenko V. I., Yanchenko Y. A., Gulina O. M., Dokukin D. A. O raschete skorosti erozionno-korroziionnogo iznosa i ostatochnogo resursa truboprovodov AES. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2010. N. 2. P. 55–63.