

УДК 620.171: 621.039.548.58

Черепанов Анатолий Петрович,

д.т.н., профессор кафедры «Управление на автомобильном транспорте»,

ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: boning89@mail.ru

АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ И НЕДОСТАТКОВ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Cherepanov A.P.

ANALYSIS OF ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF MODERN METHODS
FORECASTING THE RESOURCE OF TECHNICAL DEVICES

Аннотация. В статье приводится анализ опубликованных работ по оценке и прогнозированию ресурса технических устройств начиная с 1988 года. Показаны преимущества и недостатки методов прогнозирования ресурса технических устройств, существующие в виде научных разработок, изобретений и методических рекомендаций на уровне нормативных документов. В основном анализ коснулся прогнозирования проектного, исходного, определяемого при изготовлении, и остаточного ресурсов. Анализ показал, что в большинстве работ и методических рекомендаций даются методы и способы оценки или прогнозирования остаточного ресурса, и только в последнее десятилетие начата разработка методов оценки исходного ресурса при изготовлении технических устройств.

Ключевые слова: безопасность, исходный ресурс, исходное состояние, остаточный ресурс, проектный ресурс, предельное состояние, прочность, риск.

Abstract. The article presents an analysis of published works on the assessment and forecasting of the resource of technical devices, since 1988. The advantages and disadvantages of methods of forecasting the resource of technical devices, existing in the form of scientific developments, inventions and guidelines at the level of normative documents, are briefly shown. Basically, the analysis concerned the forecasting of design, initial, determined at manufacture, and residual resources. The analysis showed that in most studies and guidelines are given methods and ways of estimating or predicting residual life, and only in the past decade initiated development of methods for the valuation of the resource in the manufacture of technical devices.

Keywords: security, source resource, the source of the condition, residual life, design life, limit state, strength, risk.

Обеспечение надежности и безопасности единичных, уникальных машин и технических устройств (далее ТУ) зависит от методов проектирования и особенностей конструкции для осуществления различных процессов [1].

Безопасность технических или технологических систем основана на теории абсолютной надежности [2], но с некоторого порога сложности, приходится иметь дело с вероятностными характеристиками. Вероятностные методы в связи со сложностью их критериев малопригодны для широкого практического использования, особенно для ТУ единичного применения и не имеющих элементов резервирования из-за недостаточного количества статистических данных наработки на отказ. Поэтому вероятностный подход к надежности сложных технических систем учитывает лишь простейшие взаимосвязи

между их элементами, хотя для них характерно взаимное влияние между собой, что требует учета причинно-следственной связи. С одной стороны, существует взаимовлияние отказов при развитии аварийной ситуации, производственные дефекты и эксплуатационные ошибки обслуживания ТУ, внешнее воздействие опасных факторов и др. [3]. С другой стороны, на надежность ТУ оказывают влияние старение, изнашивание и высокие нагрузки [4].

Известными методами решаются задачи продления срока службы, либо определения остаточного ресурса различных ТУ. Так, например, с применением вероятностных моделей прогнозируется средний ресурс [5], а срок эксплуатации назначается намного ниже.

Предельное техническое состояние (ТС) может быть описано временными функ-

циями для технических систем изменением характеристик, падением чувствительности, разрешающей способности и др. Существует множество публикаций и документов, когда затрагивается проблема ресурса, но чаще всего, кроме заявлений, никаких конкретных качественных или количественных показателей и параметров ресурса не указывается [6].

Очевидно, что ресурс следует задавать при проектировании и изготовлении, а затем по окончании назначенного срока эксплуатации, но для этого нужно научное обоснование определения оптимального ресурса в соответствии с ТС, чтобы достигался баланс между двумя противоречиями: уменьшением эксплуатационных издержек или снижением ожидаемого ущерба от аварий, вызванных разрушением ТУ.

В работах [7, 8] резервом запаса прочности по отношению к нормативному, рассчитанному, например, из отношения фактических толщин стенок за вычетом прибавки к расчетной толщине стенки определяют остаточный ресурс ТУ. Согласно [9] он определяется техническим диагностированием (ТД), скоростью коррозии, количеством циклов и ползучестью материала за период эксплуатации, как показано на рис. 1, но его оценка обусловлена погрешностями от 50 % до 114 % [10].

Оценка гамма-процентного ресурса [11] показывает минимальную величину его выработки при нормативных запасах прочности и доверительной вероятности близкой к единице, но некоторой вероятностью выхода их за пределы нормативных. При переходе ТУ в предельно допустимое ТС, при отсутствии его мониторинга, задают назначенный ресурс, который чаще всего не подтвержден ни расчетами, ни экономическим обоснованием.

Воздействием двух различных по величине нагрузок на исследуемый материал методом акустической эмиссии [12] регистрируют импульсы и по скорости отсчета импульсов определяют запас прочности материала. Однако это не дает достоверного прогноза снижения запаса прочности задолго до разрушения материала, если материал ранее не нагружался и не имеет дефектов, поэтому сложно определить остаточный ресурс ТУ только по запасу прочности исследуемого материала с дефектами [13].

Фактические запасы ударной вязкости и толщины стенок сравнивают с величинами

ранее не нагруженного образца [14], затем по минимальной толщине и усредненному сроку службы исследованной части стенки с вероятностью 95 % по одному из типичных узлов определяют остаточный ресурс всего ТУ, не учитывая ТС других его частей.

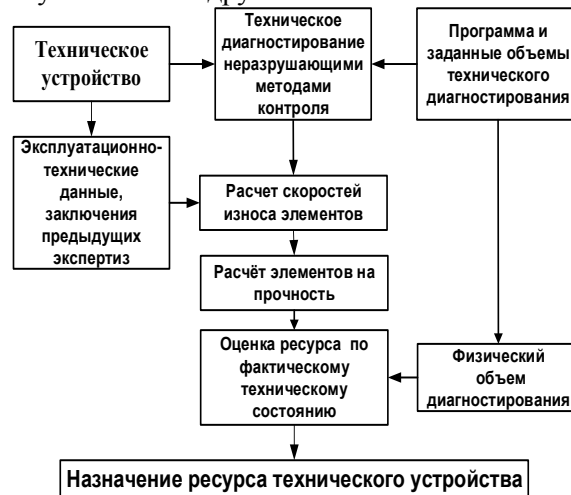


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма оценки и назначения ресурса сосудов по РД

03–421–01

Достоверность выполнения контроля в работе [15] определяется количественным показателем эффективности ТД, дефектностью, вероятной степенью риска отказа или разрушения ТУ. Методом [16] определяют количество циклов нагрузок за период снижения остаточной толщины стенки вследствие коррозии, малоциклового усталости и старения, по ним строится зависимость изменяющейся коэрцитивной силы и по этой зависимости рассчитывается остаточный ресурс всего ТУ, но учтены не все показатели ТС.

Отличие метода [17] от приведенного в [12] состоит в определении остаточных напряжений через определенный интервал времени между вторым и первым этапами измерений, который отнесен к наработке до ТД. Достоверность неразрушающего контроля и степень дефектности [18] определяют по образцу с дефектами, расположенными в нем случайным образом и сравнивают с реальными дефектами. Метод имеет исследовательский характер, непригодный для практического применения. Методы [19, 20] служат для косвенного определения изношенности подшипников и других пар трения машин. В [21] один элемент исследуют и определяют параметры его ТС, если выявлены дефекты,

их устраняют, уточняют параметры эксплуатации ТУ или определяют остаточный ресурс.

Анализ методов, разработанных к 2010 году, показал, что они не содержат комплексного подхода, который необходим для прогнозирования исходного, текущего и остаточного ресурса ТУ, поскольку не учитывают ряд обстоятельств:

1. Отсутствует оценка проектного и исходного ресурса при изготовлении.

2. Не учитывается степень ответственности ТУ и вероятностные параметры достоверности оценки запасов прочности и запасов толщин стенок или сечений заменяемых элементов.

3. Отсутствуют нормы на численные показатели коррозии и коррозионной стойкости материалов [24].

4. Не оценивается ресурс усиливаемых или устанавливаемых взамен изношенных элементов ТУ.

5. Не применяются количественные показатели полноты и объема ТД.

6. Не включены в нормы такие термины как степень износа и запас ресурса, которые необходимы для прогнозирования проектного и исходного ресурсов.

В основном ранее рассматривался остаточный ресурс [25], как разность между расчетным сроком службы и временем эксплуатации.

Многокритериальная система оценки ресурса [26], направлена на совершенствование методов прогнозирования остаточного ресурса как наработки ТУ от ввода его в эксплуатацию, а также после ремонта до предельного состояния, которое задано нормативно-технической документацией.

Ресурс от срока службы отличается тем, что выражается не временем, а физической величиной, которая устанавливается расчетом, экспериментом или статистической информацией, определяемой предшествующей эксплуатацией до момента достижения предельного состояния. Для технических систем ресурс до достижения их предельного состояния может задаваться физическими величинами, например, зависящими от степени снижения запаса прочности или толщины стенки при коррозии за некоторый промежуток времени [6].

В качестве параметров, характеризующих ТС, в работе [26] предусмотрены коэффициенты запаса прочности по напряжени-

ям, деформациям, числу циклов, времени температурам и др. Нормируемые запасы прочности по местным напряжениям и деформациям рекомендовано принимать не ниже $1,15 \div 1,25$, а по ресурсу в пределах $3 \div 5$. Там же введено понятие коэффициента безопасности.

Функционал долговечности [26] показывает, что запас прочности есть величина переменная и с течением времени снижается по мере износа, появления дефектов и деградации материала, снижения несущей способности и увеличения механических напряжений элементов.

Как известно, основная задача определения ресурса состоит в минимизации затрат на проектирование, эксплуатацию, вывод из эксплуатации и ущерб от возможных аварий. Для этого в конце прошлого века в авиационном транспорте родилась идея «ресурсного проектирования». На западе есть научная дисциплина «life-cycle engineering» [27], которая занимается оценкой жизненного цикла изделия. Совещанием рабочей группы [6] рассмотрен вопрос по разработке стандартов и информационно-технического справочника для железнодорожного транспорта в области оценки ресурса, а точнее идеология «ресурсного проектирования». Отмечалось, что начата разработка стандартов по методам оценки ресурса и по описанию порядка процедур, касающихся его назначения. В то же время остаются вопросы, что именно понимается под стандартами и как они соотносятся с действующей нормативно-технической базой. Предложено создать определенную группу стандартов, посвященных понятию ресурса, так как в разных отраслях специалисты понимают и используют его по-разному. Информационно-технический справочник поможет проектировщикам, изготовителям и специалистам по эксплуатации рассчитывать ресурс объектов на разных стадиях их жизненного цикла. Иногда объект еще может эксплуатироваться несколько лет, а его списывают согласно термину «экономический ресурс», когда расчет основан на здравом смысле и эмпирических данных и не оценивается степень накопления повреждений. В основе оценки ресурса лежит, прежде всего, степень накопления повреждений.

Можно рассчитать математическое ожидание риска и его стоимости, но его распределение также неизвестно (или только частично известно). Есть некоторые утвер-

ждения, что вся неопределенность может быть определена вероятностно, но мы сохраняем различие между риском и неопределенностью [28]. К сожалению, в мире пока не создан универсальный подход к адекватному прогнозированию будущих параметров состояния на основе текущих данных, уровень неопределенности которых слишком высок, но на практике, тем не менее, в каждом конкретном случае часто пользуются субъектив-

таточного времени до появления деградации неэффективной. Вместе с тем, для принятия мер по устранению причин выхода систем из строя необходим научно обоснованный прогноз остаточных временных ресурсов. Вышеизложенное характеризует актуальность проблемы исследований риска и ресурса различных промышленных объектов [30, 31].

Например, для реализации функционала долговечности [26] необходимо знать проектный ресурс и исходный ресурс при изготовлении для того, чтобы после выработки назначенного срока эксплуатации, оценив фактическое ТС можно было сравнить его с исходным ТС, определить снижение несущей способности, степень износа и деградиционных процессов, затем рассчитать остаточный ресурс и назначить срок эксплуатации ТУ.

Оценка полного и расчетного ресурса, в течение которого гарантируется надежность и безопасность эксплуатации до предельного состояния показана в [32] для тонкостенных оболочечных конструкций сосудов, аппаратов и трубопроводов. Прогнозирование исходного ресурса ТУ в [33] основано на применении первичного ТД и ресурсно-прочностных исследований (РПИ) в период изготовления [22, 23]. Затем по окончании назначенного срока эксплуатации определяется остаточный ресурс ТУ проведением повторного ТД и РПИ.

Методы [32, 33] применимы для оценки ресурса в процессе изготовления ТУ, если использовать проектные эксплуатационно – технические данные и проводить первичное РПИ по фактическим, а не по проектным размерам. При изготовлении следует учитывать предельные отклонения толщин и сечений элементов. Но точнее было бы определять фактические толшины и сечения визуально-измерительным контролем и по ним рассчитывать прочность элементов и определять исходный ресурс ТУ. По окончании заданного ресурса следует проводить повторное ТД и по его результатам осуществлять РПИ, определяя допустимость обнаруженных дефектов и их опасность, деградацию и износ, рассчитывать прочность и определять остаточный ресурс элементов и всего ТУ. Для реализации этого метода выбор показателей для оценки ТС приведен в работе [34], а основные задачи прогнозирования ресурса показаны в [15].

В работе [35] показана блок-схема алгоритма компьютерной обработки результа-

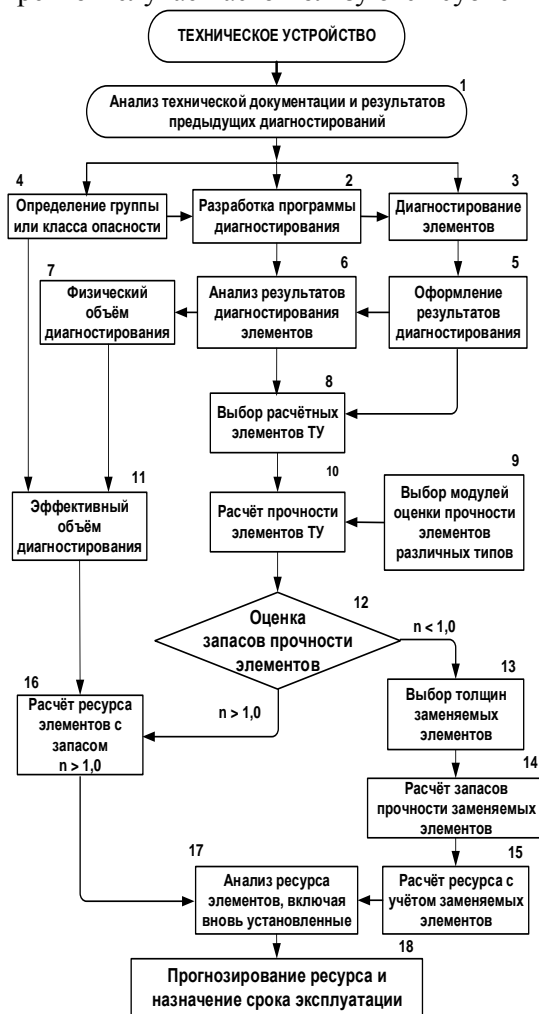


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма обработки результатов ТД, расчетов прочности и ресурса

ными экспертными оценками и регрессионным анализом полученных данных, а также моделированием. В ряде случаев вероятностные модели содержат множество упрощений и часто не учитывают инфраструктуру технических систем, неоднородность угроз. Не учитываются различия в технологиях управления и восстановления целостности для различных элементов этих систем [29]. Эти аспекты и редкость многих случайных событий делают статистическую оценку ос-

тов ТД, расчетов прочности и ресурса, бывших в эксплуатации ТУ (рис. 2). Алгоритмом предусмотрены расчет прочности и оценка ресурса ТУ. Усиление изношенных или ослабленных элементов также обосновывают расчетом прочности, а затем по наиболее слабому из элементов, в том числе, замененных или усиленных, определяют ресурс ТУ.



Рисунок 3 – Система экспертизы промышленной безопасности ТУ предприятия

Для осуществления РПИ разработан комплекс компьютерной обработки результатов ТД сосудов и аппаратов. Основные принципы построения комплекса представлены в работе [35, 36]. При обработке данных вся информация хранится в электронных папках системы экспертизы промышленной безопасности ТУ (рис. 3). Ввод данных осуществляется специалистами подразделений на различных этапах подготовки заключения экспертизы промышленной безопасности ТУ. В данное время надежность и безопасность решается преимущественно повышением запасов прочности при проектировании [26], что в свою очередь увеличивает ресурс, но не всегда оправдано с точки зрения экономии средств и снижения себестоимости.

Имеются объекты, находящиеся в эксплуатации 50 и более лет, запасы прочности которых не исчерпаны, а производственная технология морально устарела.

Исследования показали, что ранее разрабатывалось направление по обеспечению более продолжительной эксплуатации уже работающих технологических комплексов, содержащих единичные и уникальные ма-

шины и ТУ, но не уделялось внимания воплощению идеи «ресурсного проектирования» [27], направленной на оценку жизненного цикла изделия от проектирования до утилизации.

Задача ресурсного проектирования, во-первых, состоит в снижении себестоимости изготовления ТУ и, соответственно, его цены. Во-вторых, необходимы условия для обеспечения равнопрочности всех ТУ технологического комплекса, что даст возможность снизить затраты на их техническое обслуживание и ремонт. В-третьих, необходимо проектирование ТУ на заданный ресурс по желанию заказчика, это повысит возможности для создания технологических комплексов на конкретный срок их эксплуатации и утилизации по его окончании. В-четвертых, технологии касаются в основном изготовления и технического контроля соответствия технических параметров требованиям стандартов и технической документации на ТУ. Поэтому, как известно, задачи ТД решаются индивидуально по окончании назначенного срока эксплуатации, то в этом случае требования к качественному изготовлению не всегда могут согласовываться с Правилами [22].

Концепция прогнозирования ресурса [37] направлена на повышение безопасности ТУ на протяжении всего жизненного цикла. Разработаны численные показатели коррозии и коррозионной стойкости металлов [38], получена закономерность снижения ресурса [39], начиная от изготовления до достижения предельного ТС по степени износа основных несущих нагрузку элементов, в том числе, соединительных деталей, сварных швов и их перекрестий и др., с сопоставлением фактических, нормативных запасов прочности и определением коэффициента безопасности на последующий срок эксплуатации ТУ. Классификация параметров ресурса ТУ на различных этапах жизненного цикла от проектирования до достижения предельного ТС приведена в [39].

Идею «ресурсного проектирования» предлагается начать с решения более простых и реализуемых на практике задач. Например, совмещением технического контроля с ТД при изготовлении, определения исходного ресурса и назначения срока безопасной эксплуатации [37, 41]. Рассмотрим технический контроль и диагностирование (ТКиД), РПИ и оценку ТС как часть техноло-

гического процесса качественного изготовления ТУ [22]. Тогда подготовка уникальных машин к декларированию и сертификации [23] может представлять единую технологию изготовления элементов, деталей, узлов и ТУ в целом, совмещенную с первичным ТКиД, РПИ, составлением заключения по исходному ТС и включения его в состав технического паспорта с подготовкой к декларированию и сертификации единичной и уникальной машины.

На рис. 4 показана структурная схема алгоритма изготовления при совмещении с ТКиД, проводимого по мере изготовления элементов, деталей и узлов, а также всего ТУ. Предложенный алгоритм предусматривает одновременно с технологическими операциями изготовления как отдельных деталей, узлов, так и ТУ в целом проводить ТКиД. Алгоритмом учтена возможность совмещения методов ТКиД элементов, деталей и узлов, и применение этих методов для всего ТУ.

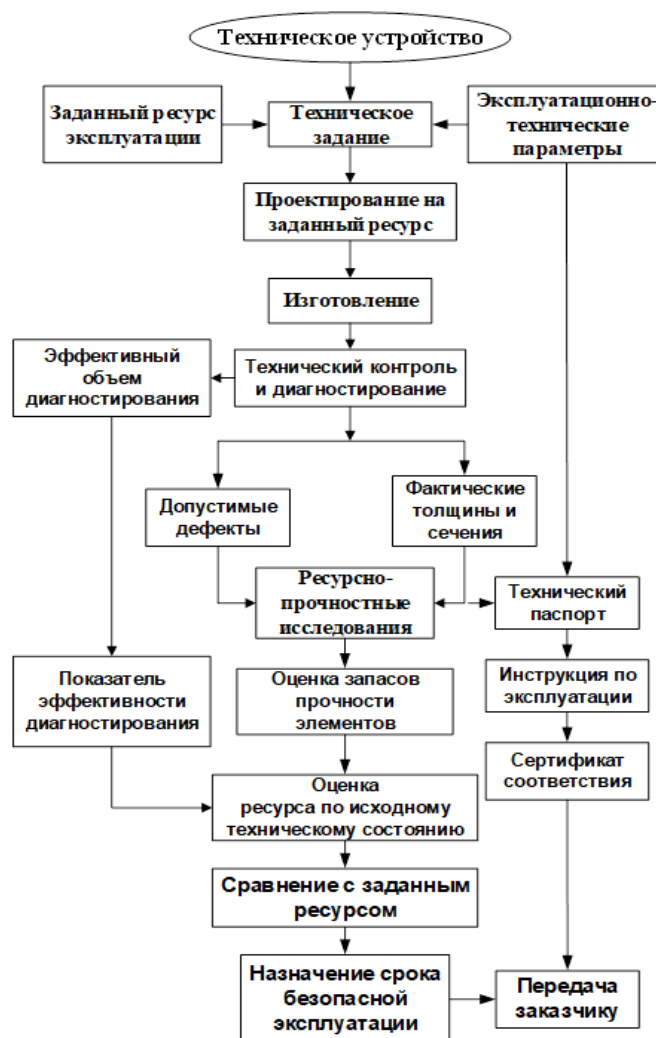


Рисунок 4 – Структурная схема алгоритма изготовления при совмещении с ТКиД

Комплекс работ по ТКиД аналогичен комплексу работ, предусмотренных экспертизой промышленной безопасности [22]. Обнаруженные при ТКиД дефекты устраняются и повторно проводится их контроль. Визуально-измерительным контролем определяют исходные (фактические) толщины, размеры и сечения элементов. Далее по проектным

техническим данным проводят РПИ каждого отдельного элемента [34] определяют запасы прочности и исходный ресурс элементов, затем по наиболее слабому из них методом слабейшего звена [26, 42] рассчитывают исходный ресурс.

Применением методов, изложенных в работе [33], определяют ресурс отдельно ка-

ждого несущего элемента, а затем всего ТУ. Последовательность выполнения алгоритма ТКиД и выбор оптимального маршрута его проведения устанавливают по совмещенной технологии в той же последовательности, что и технологические операции изготовления элементов, деталей, узлов ТУ [40]. На основе данных ТКиД проводят анализ фактического технического состояния ТУ. Далее проводят заключительные технологические операции консервации, подготовки ТУ к транспортировке и к монтажу на месте эксплуатации, включающие нанесение защитных покрытий, теплоизоляции, установку заглушек и т.д. За этот же период времени проводятся расчеты прочности по исходному техническому состоянию с учетом фактических толщин стенок, нормированных искажений формы, характеристик механических свойств конструкционных материалов. В паспорт ТУ включают расчеты прочности, оценку запасов прочности и расчет исходного ресурса [33], заключение по исходному ТС и пакет документации, подготавливаемой для сертификации или декларирования ТУ.

Основными показателями для оценки ресурса в [40] приняты запасы прочности, показатель коррозии и коррозионной стойкости материалов, в качестве дополнительных показателей приняты степень износа, группа или класс опасности ТУ для окружающей среды. Технологическими показателями можно принять объемы ТКиД элементов, длины сварных швов и относительной площади поверхности элементов.

Рассмотрим попытку получения приближенной зависимости ресурса, которая обеспечивала бы приемлемую для практики точность его оценки. Используем для нахождения величин $\Delta n_1, \Delta n_2, \Delta n_3$ исходные, текущие и прогнозируемые значения запасов прочности или запасов толщин стенок, определенных прочностными расчетами. Как показано в работе [25], снижение параметров, выраженных через запасы прочности (n) за период (T), принято в качестве показателя износа, который может быть определен разностью:

$$\Delta n_{\text{и}} = n_{\text{и}} - n_{\text{н}},$$

где $n_{\text{и}}$ – исходный запас прочности при изготовлении; $n_{\text{н}}$ – нормативный запас прочности.

В работе [41] дано определение главного параметра износа и допустимой совокупной степени износа связанной с безопас-

ностью машин, для которых характерен такой главный параметр, как например, коррозионный, абразивный, усталостный износ, и другие виды износа от воздействия высоких и низких температур и давлений химически активных сред, приводящих к деградации механических свойств материала. Там же даны методы определения степени износа, который выражен через коэффициенты физического износа и технического состояния машины [40].

Величину $\Delta n_{\text{и}}/n_{\text{н}}$, примем как допустимый совокупный износ. Разделив $\Delta n_{\text{и}} = n_{\text{и}} - n_{\text{н}}$ на $n_{\text{н}}$, получим степень износа за период ΔT , выраженную формулой:

$$Z = f(\Delta T) = \frac{n_{\text{и}} - n_{\text{н}}}{n_{\text{н}}}. \quad (1)$$

Снижение запаса прочности за предыдущую эксплуатацию выразим разностью:

$$\Delta n_k = n_{\text{и}} - n_k,$$

где n_k – текущий запас прочности.

Тогда, как и в предыдущем случае, степень износа за период T_{k+1} можно определить формулой:

$$Z_{k+1} = f(T_{k+1}) = \frac{n_{\text{и}} - (n_k - n_{\text{и}})}{n_k}. \quad (2)$$

Предполагая, что в дальнейшем износ будет сопровождаться таким же снижением запаса прочности, то закономерность его снижения может быть определена запасом износа на период T_{k-1} . В работе [39] принято отношение $n_k/\Delta n_k$ для последующего периода эксплуатации T_{k-1} , которое в работе [26] названо коэффициентом безопасности, в данном случае определяемый формулой:

$$K_{k-1} = f(T_{k-1}) = \frac{n_k}{n_{\text{и}} - n_k}. \quad (3)$$

Коэффициент безопасности показывает возможную степень износа на последующий период времени T_{k-1} . Для оценки ресурса, как принято в работе [41], рассмотрим формулу:

$$T_k = t_3 \sqrt{\frac{n_k}{n_{\text{и}} - n_k}}, \quad (4)$$

где t_3 – заданный срок эксплуатации.

Используем формулы (1÷3), предложенные в [26] для определения допустимых сроков эксплуатации $[\tau]$ на различных этапах жизненного цикла ТУ по снижению толщин стенки и скоростями износа (коррозии), определяемыми на каждом этапе, соответственно. В формулу (4) вместо величины t_3 подставим величину $[\tau]$, а вместо запасов прочности подставим запасы толщины стенки. Предложенными формулами с применением величин запаса по ресурсу:

$$n_{\tau и}, n_{\tau к}, n_{\tau о} \text{ и } [\tau]_{\text{пред}}^S,$$

где $n_{\tau и}, n_{\tau к}, n_{\tau о}$ и $[\tau]_{\text{пред}}^S$ – исходный, текущий, остаточный и предельный запасы по ресурсу.

Покажем возможность определения ресурса безопасной эксплуатации измеряемых в годах с условной вероятностью (4) достижения предельного состояния на протяжении всего жизненного цикла ТУ.

Исходный ресурс:

$$T_{и} = [\tau_{и}] \cdot \sqrt{W_{и} \cdot \beta_{и} \cdot \left(q_{и} \frac{n_p}{n_{и}^{\lambda_{и}} - n_p} \right)^{\xi}}. \quad (5)$$

Текущий ресурс:

$$T_{к} = [\tau_{к}] \cdot \sqrt{\beta_{к} \cdot \left(q_{к} \frac{n_k^{\lambda_k}}{n_{и}^{\lambda_{и}} - n_k^{\lambda_k}} \right)^{\xi}}. \quad (6)$$

Остаточный ресурс:

$$T_{о} = [\tau_{о}] \cdot \sqrt{W_{о} \cdot \beta_{о} \cdot \left(q_{о} \frac{n_o^{\lambda_o}}{n_{и}^{\lambda_{и}} - n_o^{\lambda_o}} \right)^{\xi}}. \quad (7)$$

где $[\tau_{и}], [\tau_{к}], [\tau_{о}]$ – исходный, текущий и остаточный допустимые ресурсы; $W_{и}, W_{к}, W_{о}$ – объемы ТД, учтенные при оценке исходного, текущего и остаточного ресурса; $\beta_{и}, \beta_{к}, \beta_{о}$ – коэффициенты дефектности, учтенные при оценке исходного, текущего и остаточного ресурса; $q_{и}, q_{к}, q_{о}$ – показатели коррозии и коррозионной стойкости, учтенные при оценке исходного, текущего и остаточного ресурса; n_o – остаточный запас прочности; ξ – степень опасности ТУ.

Вероятностный параметр достоверности оценки запаса прочности по напряжениям, деформациям, числу циклов, времени и температурам, принятый для:

– исходного:

$$\lambda_{и} = f(\Delta n_{\sigma}^и, \Delta n_e^и, \Delta n_N^и, \Delta n_{\tau}^и, \Delta n_t^и);$$

– текущего

$$\lambda_{к} = f(\Delta n_{\sigma}^к, \Delta n_e^к, \Delta n_N^к, \Delta n_{\tau}^к, \Delta n_t^к);$$

– остаточного

$$\lambda_{о} = f(\Delta n_{\sigma}^о, \Delta n_e^о, \Delta n_N^о, \Delta n_{\tau}^о, \Delta n_t^о),$$

где $\Delta n_{\sigma}, \Delta n_e, \Delta n_N, \Delta n_{\tau}, \Delta n_t$ – относительная ошибка оценки запасов прочности по напряжениям, деформациям, числу циклов, времени и температурам.

Например, Δn_{σ} зависит от ошибки определения механических напряжений. Диапазоны относительных ошибок текущих запасов прочности определены по преобладающим факторам износа:

$$\lambda = \xi(\lambda_n \mu),$$

где μ – уровень значимости запаса прочности

от степени нагруженности выбранного элемента ТУ; λ_n – вероятностный параметр достоверности оценки запаса прочности по напряжениям, деформациям, числу циклов, времени и температурам, соответственно.

На данном этапе исследований уровень значимости можно назначить, например, логическими значениями (0 и 1). Если принято, что $\mu=0$, то данный параметр запаса прочности не учитывается при оценке λ .

Таким образом, с использованием формул (5÷7) может быть реализована модель прогнозирования ресурса элементов ТУ на любом этапе от проектирования до достижения предельного состояния, а также возможна оценка ресурса замененных и усиленных элементов ТУ.

Проведенные формулы дают основание полагать, что экспоненциальная зависимость (рис. 5) отражает жизненный цикл ТУ от изготовления до достижения предельного состояния с учетом износа и изменения расчетных характеристик.

При определении рисков разрушения ТУ должны учитываться факторы, представляющие собой следующие основные виды опасности:

- недопустимые отклонения параметров конструкции и сборочных единиц;
- перегрев и превышение давления;
- повреждения, связанные с отложением примесей рабочей среды на внутренних поверхностях;
- коррозия или иные виды износа ТУ.

Поэтому на практике срок безопасной эксплуатации ТУ следует назначать ниже по отношению к расчетному ресурсу, определенному по формулам (5÷7) с учетом мнения экспертов согласно условию:

$$T_{и} = \min [T_{и}, T_{к}, T_{о}] - T_{Сн}, \quad (8)$$

где $T_{Сн}$ – снижение ресурса, определяемое проектировщиком или экспертами по результатам дополнительных исследований, или экспертной оценкой параметров, которые не представляется возможным подтвердить расчетами прочности и ресурса, а также заменяемых или усиливаемых элементов ТУ.

Предположим, что $t_s = 20$ лет принят за нормативный, или определен по методике [9], исходный запас прочности задан величиной $n_{и} = 2,0$ и рассчитаем ресурс по формуле (5).

На рис. 5 покажем экспоненциальную зависимость ресурса при снижении запаса прочности от 2,0 до 1,0 и увидим, на какую

величину через интервалы времени снижается ресурс [25].

Учитывая, что фактические запасы прочности ниже проектных $n_{и} < n_{п}$, например, вследствие толщин стенок по нижнему предельному отклонению, или из-за погрешности измерения. При $n_{и} = 2,0$ исходный ресурс составит $T_{и}=63,3$ года. При $n_{и}=1,7$ – $T_{и}=40$ лет, и т.д.

В предположении, что при толщине 12 мм и $n_{к}=1,52$ остаточный ресурс составит $T_{к}=20$ лет, по окончании которого появляется риск выхода из строя. Экспоненциальная зависимость (рис. 5) показывает, что если $n_{к}$ близко к единице, то и остаточный ресурс приблизится к нулевому значению. Результат построения зависимости (рис. 5) обосновывает применимость закономерности для рас-

чета ресурса на различных этапах жизненного цикла единичных и уникальных машин и ТУ.

В качестве примера рассчитаны коэффициент безопасности, запасы толщины стенки и ресурс корпуса, изготовленного из листа с номинальной толщиной $S_{и}=16$ мм и предельными отклонениями $d_{s(-)}=0,4$ мм и $d_{s(+)}=0,15$ мм, которые учтены при изготовлении, а далее учитывалась только ошибка измерения толщины $D_{к}=0,6$ мм.

Толщина стенки за период эксплуатации снижается до расчетной $S_{к}=7,9$ мм. Суммарная погрешность толщины с учетом предельных отклонений и ошибки измерения рассчитана по формуле: $\delta_s = (S_{и} \pm d_s) - (S_{к} \pm D_{к})$.

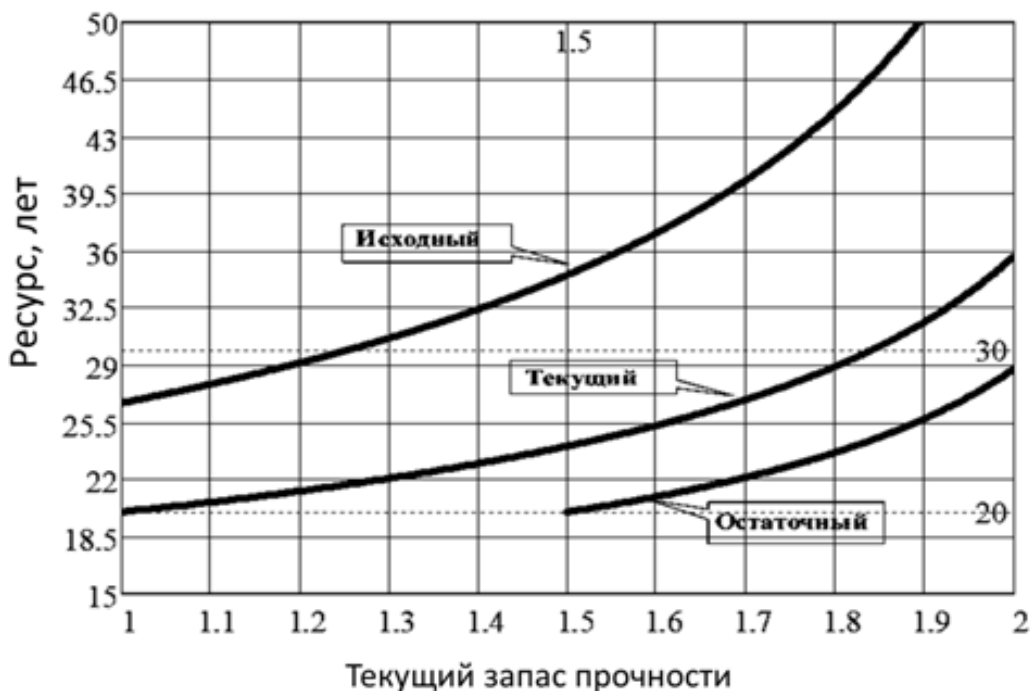


Рисунок 5 – Экспоненциальная зависимость исходного, текущего и остаточного ресурса от запасов

Таблица 1

Расчет ресурса в зависимости от толщины стенки

Толщина стенки	Запас толщины стенки				Коэффициент безопасности			Ресурс, лет			
	Номи- нальный	Погрешность			Номи- нальный	Погрешность		Теку- щий	Погрешность ресурса		
мм	n_k	n_{k+}	n_{k-}	%	K_k	K_{k+}	K_{k-}	T_k	T_{k+}	T_{k-}	%
16	2,03	2,12	1,90	7	10,13	20,18	5,81	63,6	89,8	48,2	48,8
14	1,77	1,87	1,70	2	4,40	6,06	3,54	41,9	49,2	37,6	13,8
12	1,52	1,61	1,44	3	2,31	2,87	1,97	30,4	33,9	28,1	9,6
10	1,27	1,36	1,19	5	1,39	1,67	1,21	23,6	25,8	22,0	8,2
7,9	1,00	1,09	0,92	4	0,85	1,01	0,74	18,4	20,1	17,2	8,0

Погрешности выражены численными значениями и в процентном отношении для удобства сравнения. Расчет ресурса в зависимости от толщины стенки показан в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что при расчетной толщине стенки запас толщины равен едини-

це, но ее достижение недопустимо. Из соображений безопасности минимально допустимая толщина стенки может быть не менее 10 мм при коэффициенте безопасности $K_k=1,39$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Под ред.: Генералова М.Б., Тимонина А.С. Том III–5. Серия: Машиностроение. Энциклопедия в сорока томах. Издание: 2-е. М. Машиностроение: 2004 г. 832 с.
2. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. Научное издание – М.: Машиностроение, 1979. – 360 с.
3. Хенли Э., Дж. Кумamoto. Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1988. – 216 с.
4. Гуськов А.В., Милевский К.Е. Надежность технических систем и техногенный риск. Серия: Учебники НГТУ, Изд-во НГТУ: 2007. – 427 с.
5. РД 26.260.005–91. Методические указания. Оборудование химическое. Номенклатура показателей и методы оценки надежности.
6. Стандарты для железнодорожного транспорта. Совещание рабочей группы по разработке стандартов и информационно-технического справочника для железнодорожного транспорта в области оценки ресурса.
7. Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник /А.М. Кузнецов, В.И. Лившиц и др. Изд. 2–е, доп. Иркутск: Издательство ГП "Иркутская областная типография №1", 1999. – 600 с.
8. Берман А.Ф. Деграция механических систем. – Новосибирск: Наука, 1998. – 320 с.
9. РД 03–421–01. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов. Серия 03. / Колл. авт. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 136 с.
10. Красных Б.А., Мокроусов С.Н., Махутов Н.А., Митрофанов А.В., Барышов С.Н. Ограничение прогнозируемого ресурса и назначаемого срока безопасной эксплуатации оборудования нефтегазового комплекса // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 30–33.
11. Богданов, Е.Л. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. шк., 2006. – 279 с.
12. Патент РФ №2167421 «Способ определения запаса прочности нагруженного материала», МПК 7 G01N 29/14, G01N 19/04. Опубликовано 05.20.2001.
13. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. М.: Машиностроение, 1995.
14. Патент РФ №2234079 Способ и устройство определения остаточного ресурса

тонкостенных оболочек из резервуарных и трубных сталей, МПК G01N 27/72. Опубликовано 2004.08.10.

15. Cherepanov A.P., Poroshin Y.V. Estimating service life of technical devices with due regard for efficiency of their diagnosis. // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2010. Т. 46. № 1. С. 103–108.

16. Пат. РФ №2292028 «Способ определения остаточного ресурса металлоконструкций», МПК G01N 3/00. Опубликовано: 2007.01.20.

17. Пат. РФ №2215280 «Способ оценки остаточного ресурса деталей», МПК G01N3/00. Опубликовано: 2003.10.27.

18. Пат. РФ 2243565, МПК 7 G01N35/00, G01N3/00 «Способ определения достоверности неразрушающего контроля (НК) дефектов, определяющих качество изготовления, надежность и безопасность эксплуатации изделия», опублик. 2004.12.27.

19. Патент РФ №2006811 Способ безразборной диагностики степени износа подшипников двигателя внутреннего сгорания, МПК 5 G01M 15/00, G01M 13/04. Опубликовано: 30.01.1994.

20. Патент РФ №2390746 Способ безразборной диагностики шатунных подшипников двигателя внутреннего сгорания, МПК 7 G01M 15/00, G01M 13/04, F16C 17/24. Опубликовано 2010.05.27.

21. Патент РФ №2253096 Способ оценки технического состояния оборудования, МПК G01M 15/00, F15B 19/00, Опубликовано 27.05.2005.

22. Правила проведения экспертизы промышленной безопасности. Утв. приказом Ростехнадзора от 14.11.2013 № 538 (Зарегистрировано в Минюсте России 26.12.2013 № 30855).

23. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением» (ТР ТС 032/2013), принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 2 июля 2013 г. № 41.

24. ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. М.: Изд-во стандартов, 1986.

25. Махутов Н.А., Пимштейн П.Г. Определение срока службы и остаточного ресурса оборудования / Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып.5. М.,

1995.

26. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч./ Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч.2: Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с.

27. Орлов Е.В. Использование метода учета «life-cycle engineering» в целях калькулирования затрат. Вестник Государственного Университета управления. № 7, 2015. – С. 188–193.

28. Möller N., “The concepts of risk and safety,” in *Handbook of Risk Theory*, S. Roeser, R. Hillerbrand, P. Sandin, and M. Peterson, Eds. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2012, pp. 55–85.

29. Varshney K.R. “Engineering safety in machine learning,” in *Proc. Inf. Theory Appl. Workshop*, La Jolla, CA, Feb. 2016.

30. Shimodaira H.. Improving predictive inference under covariate shift by weighting the log-likelihood function, *Journal of statistical planning and inference*, vol. 90, no. 2, pp. 227–244, 2000.

31. On the Safety of Machine Learning: Cyber-Physical Systems, Decision Sciences, and Data Products Kush R. Varshney, Data Science Theory and Algorithms IBM Thomas J. Watson Research Center Yorktown Heights, New York 10598, Homa Alemzadeh Electrical and Computer Engineering University of Virginia Charlottesville, Virginia 22904.

32. Патент РФ №2436103 Способ прогнозирования ресурса объектов повышенной опасности. // Черепанов А.П. Заявитель: Черепанов А.П. Опубл. 10.12.2011, Бюл. №34.

33. Патент РФ №2454648, МПК G01M15/00, G01N3/00. Способ прогнозирования ресурса технических устройств // Черепанов А.П. Заявитель: Черепанов А.П. Опубл.: 27.06.2012, Бюл. № 18.

34. Cherepanov A.P. Selection of indicators for assessment of overall, computed, and remaining service lives of production equipment. // *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 46, Nos. 9–10, 2011, pp. 624–630(7).

35. Колмаков В.П., Черепанов А.П., Порошин Ю.В., Вуйчик В.З. Комплекс компьютерной обработки результатов технического диагностирования // *Безопасность труда в промышленности*. - 2010. – № 7. – С. 59–63.

36. Черепанов А.П., Порошин Ю.В. Компьютерная обработка результатов диагностирования сосудов, резервуаров и трубо-

проводов// Сб. тез. 3-й Междунар. конф. «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике». – М.: РОНКТД, 2002. – 270 с.

37. Cherepanov A.P. Concept of methodological recommendations for estimating service life of industrial equipment based on service-life-safety studies. // Chemical and Petroleum Engineering. 2012. Т. 47. № 11–12. С. 790-795.

38. Черепанов А.П., Ляпустин П.К. Исследование коррозионной стойкости металлов нефтехимического оборудования // В сборнике: инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК–2017) сборник трудов Международной научно-практической конференции. 2017. С. 233–239.

39. Черепанов А.П., Ляпустин П.К. Закономерности снижения ресурса уникальных машин. // Современные технологии. Систем-

ный анализ. Моделирование. 2019. № 3 (63). С. 37–45.

40. Cherepanov A., Lyapustin P. Forecasting Resource as a Method of Increasing the Security // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 253 012004. 2017.

41. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов / Под общ. ред. Махутова Н.А. – М.: МГОФ «Знание», 2015, - 600 с.

42. Москвичев В.В. Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений: В 3 ч. / В.В. Москвичев; Отв. ред. Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2002. Ч. 1: Постановка задач и анализ предельных состояний. – 2002. – 106 с.

УДК 621.352.6 : 691.175.5/.8 : 66-96

Черниговская Марина Алексеевна,

к.т.н., доцент кафедры «Химическая технология топлива»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: pm888@mail.ru

СПОСОБЫ МОДИФИКАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИТОВ С ПРОТОНПРОВОДЯЩИМИ СВОЙСТВАМИ

Chernigovskaya M.A.

THE ANALYSIS OF OPERATION OF THE FOAMING APPARATUS OPERATION FOR CHEMICALLY CONTAMINATED WATER TREATMENT

Аннотация. В статье рассмотрены основные способы модификации полимеров с целью получения протонпроводящих материалов для топливных элементов.

Ключевые слова: модификация, полимерные материалы, протонная проводимость, топливные элементы.

Abstract. The main methods of polymer modification to obtain proton-conducting materials for fuel cells were discussed.

Keywords: modification, polymer materials, proton conductivity, fuel cells.

Одним из интересных направлений химии и технологии полимеров является получение материалов, обладающих протонпроводящими свойствами, которые широко применяются для создания твердополимерных топливных элементов. Отличительной особенностью данных материалов является наличие в их структуре функциональных групп, способных легко присоединять и отщеплять протон водорода, облегчая его перемещение по поверхности мембраны [1].

Введение в состав полимера таких групп может осуществляться несколькими способами. Их можно разделить на две большие группы:

- методы физической обработки полимера, при которых химическая структура исходной полимерной цепи не изменяется;
- методы химической модификации, проводимые с изменением химического строения цепи полимера.