

ries: Earth and Environmental Science. Сер. "International Baikal Investment and Construction

Forum "Spatial Restructuring of Territories"
2021. С. 012067.

УДК 62-1/-9

Черепанов Анатолий Петрович,

*д.т.н., профессор кафедры «Управление на автомобильном транспорте»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: boning89@mail.ru*

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ЕДИНИЧНЫХ И УНИКАЛЬНЫХ МАШИН

Cherepanov A.P.

OF FORECASTING THE RESOURCE OF SINGLE AND UNIQUE MACHINES

Аннотация. В статье приведен анализ методов прогнозирования ресурса единичных и уникальных машин по научным работам, изобретениям и нормативным документам, начиная с 1988 года. Анализ коснулся работ, посвященных прогнозированию проектного, исходного, определяемого при изготовлении, и остаточного ресурсов. Рассмотрены преимущества и недостатки методов оценки ресурса единичных и уникальных машин. Анализ показал, что в большинстве работ и методических рекомендаций даются в основном методы прогнозирования остаточного ресурса. Как известно, обеспечение безопасности начинается на стадии разработки проектов, поэтому следует оценивать не только остаточный ресурс, как это принято в большинстве научных разработок, но и более точно определять исходный ресурс при изготовлении и текущий ресурс при эксплуатации. В более ранних работах рассматривалась только надежность опасных объектов, и только в последнее десятилетие начата разработка методов оценки проектного и исходного ресурса при изготовлении единичных и уникальных машин. Показаны пути развития методов оценки ресурса единичных и уникальных машин при их изготовлении в соответствии с требованиями стандартов и технической документации.

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

Abstract. The article presents an analysis of methods for predicting the resource of individual and unique machines based on scientific works, inventions, and regulatory documents since 1988. The analysis touched upon the works devoted to forecasting the design, initial, determined during manufacture, and residual resources. The advantages and disadvantages of methods for estimating the resource of single and unique machines are considered. The analysis showed that in most works and methodological recommendations, methods of forecasting the residual resource are mainly given. As is known, safety begins at the stage of project development, therefore, it is necessary to evaluate not only the residual resource, as is customary in most scientific developments, but also to more accurately determine the initial resource during manufacture and the current resource during operation. In earlier works, only the reliability of hazardous facilities was considered, and only in the last decade has the development of methods for evaluating the design and initial resource in the manufacture of single and unique machines begun. The ways of development of methods for assessing the resource of individual and unique machines in their manufacture in accordance with the requirements of standards and technical documentation are shown.

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 (УМиТУ) единичного применения зависит от методов проектирования и особенностей конструкции для осуществления различных процессов [1].

Безопасность технических или технологических систем основана на теории абсо-

лютной надежности [2], но с некоторого порога сложности приходится иметь дело с вероятностными характеристиками. Вероятностный подход к надежности сложных технических систем учитывает лишь простейшие взаимосвязи между их элементами. Поэтому вероятностные методы из-за недостаточного количества статистических данных наработ-

ки на отказ малопригодны для оценки надежности и безопасности единичных УМиТУ, не имеющих элементов резервирования. С одной стороны, существует взаимовлияние отказов при развитии аварийной ситуации, производственные дефекты и эксплуатационные ошибки обслуживания, внешнее воздействие опасных факторов и др. [3]. С другой стороны, на надежность УМиТУ оказывают влияние старение, изнашивание и высокие нагрузки [4].

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

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]. В них также отмечается, что предельное техническое состояние (ТС) УМиТУ определяется изменением технических характеристик, падением чувствительности, разрешающей способности, временными функциями и др.

Очевидно, что ресурс УМиТУ 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 их разрушением.

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. Согласно [9] он определяется техническим диагностированием (ТД), скоростью коррозии, количеством циклов и ползучестью материала за период эксплуатации, как показано на рисунке 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 с некоторой вероятностью выхода их за пределы нормативных. При переходе УМиТУ в предельно допустимое ТС и 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 имел дефектов, поэтому сложно определить остаточный ресурс 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 УМиТУ, не учитывая ТС других его частей.

Достоверность выполнения контроля в работе [15] определяется количественным показателем эффективности ТД, дефектностью, вероятной степенью риска отказа или разрушения. 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 УМиТУ, но при этом учитываются 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 преимущественно исследовательский характер, но не пригоден для практического применения. Методы [19, 20] служат для косвенного определения изношенности подшипников и других пар трения машин. В [21] исследуют

обычно один элемент и определяют параметры его ТС. Если в этом элементе выявлены дефекты, их устраняют, уточняют параметры

эксплуатации машины или определяют остаточный ресурс.

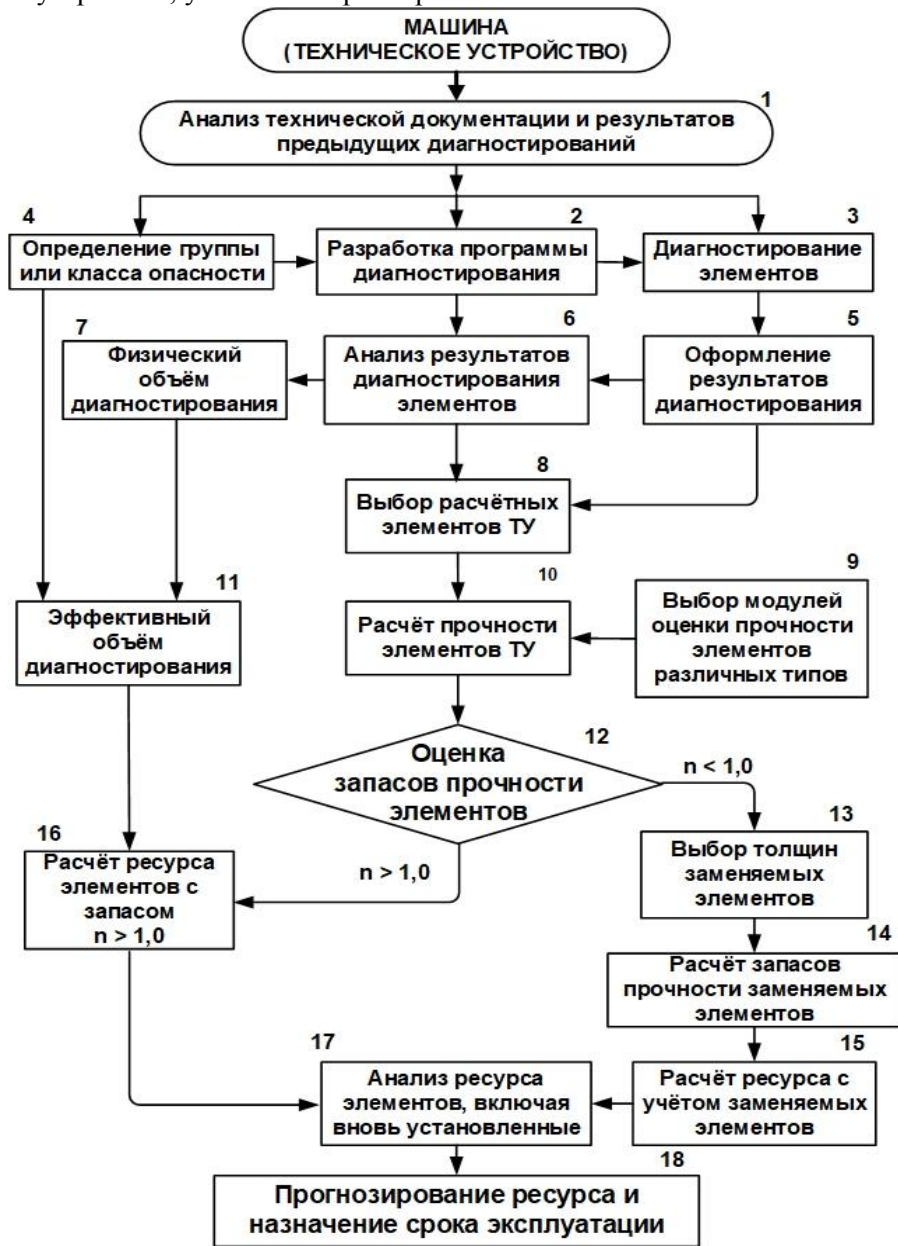


Рисунок 1 – Схема обработки результатов диагностирования машины

Анализ методов прогнозирования ресурса единичных и уникальных машин показал, что они не содержат комплексного подхода, который необходим для прогнозирования исходного, текущего и остаточного ресурса УМиТУ, поскольку не учитывают ряд обстоятельств:

1. Отсутствует оценка проектного и исходного ресурса при изготовлении.

2. Не учитывается степень ответственности машины 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.

6. Не применяются количественные показатели полноты и объемы ТД.

7. Не включены в нормативы 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] также 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.

Как широко известно, ресурс от срока службы отличается тем, что выражается не временем, а физической величиной, которая устанавливается расчетом, экспериментом или статистической информацией. Эта физическая величина определяется предшествующей эксплуатацией до момента достижения предельного ТС. Для УМиТУ ресурс до достижения их предельного состояния может задаваться физическими величинами, например, зависящими от степени снижения запаса прочности или толщины стенки при коррозии, от степени увеличения зазоров во вращающихся деталях и т.д. за некоторый промежуток времени [6].

В качестве параметров, характеризующих ТС, в работе [26] предусмотрены коэффициенты запаса прочности по напряжениям, деформациям, числу циклов, 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, однако, он не был выражен численным показателем. Но принятый в [26] функционал долговечности 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.

Следует отметить, что основная задача определения ресурса состоит в минимизации затрат на проектирование, эксплуатацию,

вывод из эксплуатации и направлена на минимизацию ущерба от возможных аварий. Для этой цели 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. С этой же целью совещанием рабочей группы [6] рассматривалась идеология «ресурсного проектирования». Был рассмотрен вопрос по разработке стандартов и, в частности, информационно-технического справочника для железнодорожного транспорта в области оценки ресурса. Отмечалось также, 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. Было предложено создать определенную группу стандартов, посвященных понятию ресурса, так как в разных отраслях специалисты понимают и используют его понятие по-разному. Без сомнения, информационно-технический справочник поможет проектировщикам, изготовителям и специалистам по эксплуатации рассчитывать ресурс объектов на разных стадиях их жизненного цикла. Поскольку иногда объект еще может эксплуатироваться несколько лет, а его списывают согласно термину «экономический ресурс», в то время, когда расчет основан на здравом смысле и эмпирических данных, но не оценивается степень накопления повреждений. Хотя в основе оценки ресурса в первую очередь должна учитываться степень накопления повреждений [26]. Можно, например, рассчитать математическое ожидание риска и его стоимости, но его распределение также неизвестно (или только частично известно). Есть некоторые утверждения, что вся неопределенность такой ситуации может быть выражена вероятностно, но мы сохраняем различие между риском и неопределенностью [28].

К сожалению, в мире пока не создан универсальный подход к адекватному прогнозированию будущих параметров ТС на основе текущих данных, уровень неопределенности которых слишком высок. На практике в каждом конкретном случае часто пользуются субъективными экспертными оценками и регрессионным анализом полученных данных [25], а также моделированием

ем. В ряде случаев вероятностные модели содержат множество упрощений и часто не учитывают инфраструктуру технических систем, неоднородность изнашивания и деградации материала. Не учитываются различия в технологиях управления и восстановления целостности элементов этих систем [29]. Эти аспекты и редкость многих случайных событий делают статистическую оценку остаточного времени до появления деградации неэффективной.

Вместе с тем, для принятия мер по устранению причин выхода систем из строя необходимо 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. Но исходное ТС, определяемое при изготовлении, не отражается в технической документации, передаваемой вместе с машиной, поскольку эта процедура не регламентирована. Поэтому сложилась такая ситуация, что невозможно по прошествии нескольких лет эксплуатации, проведя оценку фактического ТС, сравнить его с исходным ТС, которое присутствовало при изготовлении.

Задача ресурсного проектирования состоит:

- в снижении себестоимости изготовления ТУ и, соответственно, его цены;
- в необходимости условий для обеспечения равнопрочности всех машин технологического комплекса, что даст возможность снизить затраты на их техническое обслуживание и ремонт;
- в необходимости обеспечения заданного ресурса машины по желанию заказчика. Это повысит возможности для создания технологических комплексов на конкретный срок их эксплуатации и утилизации по его окончании.

Заводские технологии касаются в основном изготовления и технического контроля соответствия технических параметров требованиям стандартов и технической документации. Поскольку, 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]. Реальная сложившаяся си-

туация сдерживает развитие методов оценки ресурса УМиТУ.

Одним из основных условий определения безопасности машины предлагается оценка полного и расчетного ресурса, в течение которого гарантируется надежность и безопасность эксплуатации до предельного ТС [32], которая основана на применении первичного ТД и ресурсно-прочностных исследований (РПИ) в период изготовления [22, 23]. Исходный ресурс следует определять по фактическому ТС и исходя из него назначать срок безопасной эксплуатации, а по окончании назначенного срока эксплуатации определять текущий или остаточный ресурс проведением повторного ТД и РПИ.

Метод [32] применим для оценки ресурса в процессе изготовления машины, 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, определять фактические толшины и сечения визуальным-измерительным контролем, а по ним рассчитывать прочность элементов и определять исходный ресурс. По окончании заданного ресурса повторным ТД и повторными РПИ определять допустимость обнаруженных дефектов и их опасность, деградацию и износ, рассчитывать прочность и определять остаточный ресурс элементов и всего УМиТУ. Для реализации этого метода выбор показателей для оценки ТС, обработка результатов ТД, расчетов прочности элементов машин, бывших в эксплуатации и основные задачи прогнозирования ресурса показаны в [15].

Схема обработки результатов диагностирования машины показана на рисунке 1.

Усиление изношенных или ослабленных элементов также обосновывается расчетом прочности, а затем по наиболее слабому из элементов, в том числе, замененных или усиленных, определяют ресурс УМиТУ.

Для осуществления РПИ разработан комплекс компьютерной обработки результатов ТД сосудов и аппаратов. Основные принципы построения комплекса представлены в работе [35]. При обработке данных вся информация хранится в электронных папках системы экспертизы промышленной безопасности (рисунок 2). Ввод данных осуществляется специалистами подразделений

на различных этапах подготовки заключения экспертизы промышленной безопасности.

В данное время надежность и безопасность решаются 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.

Идею «ресурсного проектирования» предлагается начать с решения более простых и реализуемых на практике задач. На-

пример, совмещением технического контроля с ТД при изготовлении, определения исходного ресурса и назначения срока безопасной эксплуатации, как предложено в работе [35]. Если рассматривать технический контроль и диагностирование (ТКиД), РПИ и оценку ТС как часть технологического процесса изготовления УМиТУ [22], то подготовка к декларированию и сертификации [23] может быть совмещена с изготовлением элементов, деталей, узлов, с их первичным ТКиД и проведением РПИ.



Рисунок 2 – Система экспертизы промышленной безопасности машин предприятия

На рисунке 3 показана схема проектирования на заданный ресурс и определения исходного ресурса при совмещении с ТКиД, проводимого по мере изготовления УМиТУ.

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 weakest link [26, 36] рассчитывают исходный ресурс. Применением методов, из-

ложенных в работе [33], определяют ресурс отдельно каждого несущего элемента, а затем всего ТУ. На основе данных ТКиД проводят анализ фактического технического состояния ТУ расчетами прочности по фактическим толщинам стенок и механическим характеристикам конструкционных материалов УМиТУ.

Для получения зависимости ресурса, которая обеспечивала бы приемлемую для практики точность его оценки, используют исходные, текущие и прогнозируемые значения запасов прочности или запасов толщин стенок, определенных прочностными расчетами, как показано в работе [32]. Снижение параметров, выраженных через запасы прочности (n) за период (T), принято в качестве

показателя износа, который может быть определен разностью:

$$\Delta n_u = n_u - n_n,$$

где n_u – исходный запас прочности при изготовлении; n_n – нормативный запас прочности.

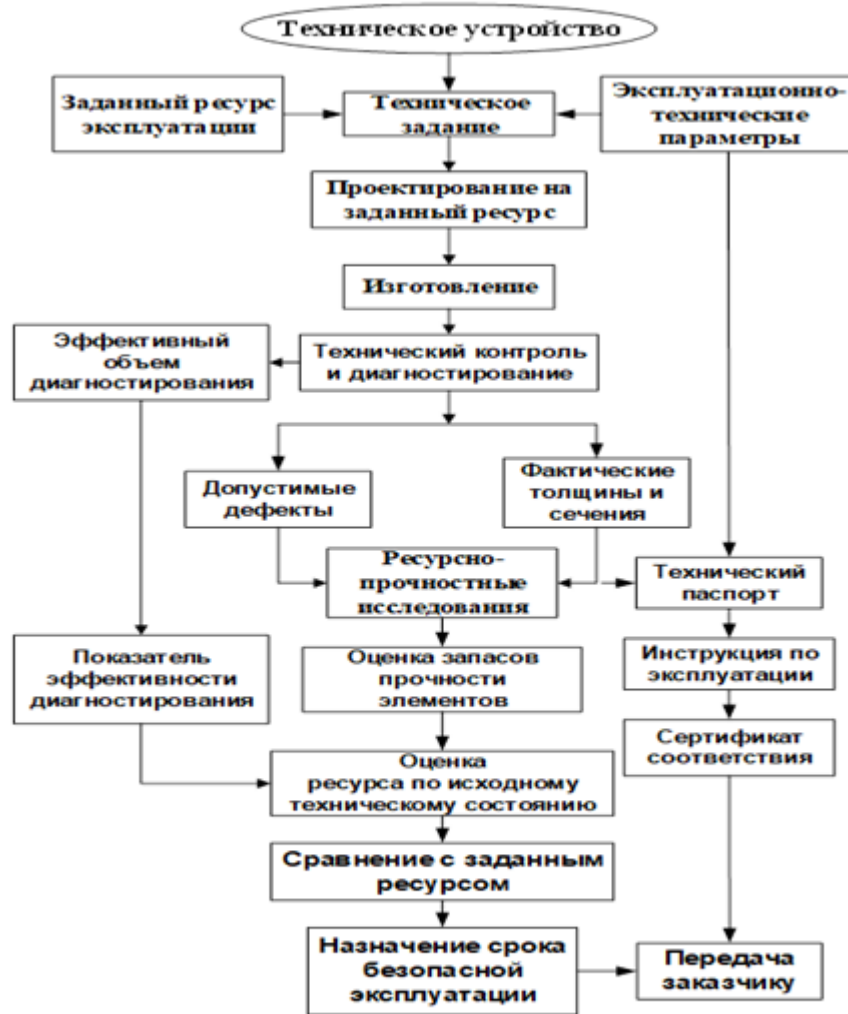


Рисунок 3 – Схема проектирования на заданный ресурс и его оценка при изготовлении

В работе [33] дано определение главного параметра износа и допустимой совокупной степени износа, связанной с безопасностью 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.

Величину $\Delta n_u/n_n$ примем как допустимый совокупный износ. Разделив $\Delta n_u =$

$n_u - n_n$ на n_n , получим степень износа за период ΔT , выраженную формулой:

$$Z = f(\Delta T) = \frac{n_u - n_n}{n_n}. \quad (1)$$

Снижение запаса прочности за предыдущую эксплуатацию выразим разностью:

$$\Delta n_k = n_u - n_k,$$

где n_k – текущий запас прочности.

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

$$Z_{k+1} = f(T_{k+1}) = \frac{n_u - (n_k - n_n)}{n_k}. \quad (2)$$

Если предположить, что в дальнейшем износ будет сопровождаться таким же снижением запаса прочности, то закономерность его снижения на период T_{k-1} может быть оп-

ределена запасом на износ. Принятое на последующий период эксплуатации T_{k-1} отношение $n_k/\Delta n_k$, которое в работе [26] названо коэффициентом безопасности, в данном случае определено формулой:

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

Коэффициент безопасности показывает возможную степень износа на последующий период времени T_{k-1} . Для оценки ресурса, рассмотрим формулу:

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

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:

$$n_{\tau u}, n_{\tau k}, n_{\tau o} \text{ и } [\tau]_{пред}^s,$$

где $n_{\tau u}, n_{\tau k}, n_{\tau o}$ – исходный, текущий и остаточный запасы по ресурсу соответственно; $[\tau]_{пред}^s$ – предельно допустимый запас по ресурсу.

Далее покажем возможность определения ресурса безопасной эксплуатации, который измеряют в годах, с условной вероятностью (4) достижения предельного состояния на протяжении всего жизненного цикла ТУ.

Исходный ресурс:

$$T_u = [\tau_u] \cdot \sqrt{W_u \cdot \beta_u \cdot \left(q_u \frac{n_p}{n_u^{\lambda_u} - n_p} \right)^\xi}. \quad (5)$$

Текущий ресурс:

$$T_k = [\tau_k] \cdot \sqrt{\beta_k \cdot \left(q_k \frac{n_k^{\lambda_k}}{n_u^{\lambda_u} - n_k^{\lambda_k}} \right)^\xi}. \quad (6)$$

Остаточный ресурс:

$$T_o = [\tau_o] \cdot \sqrt{W_o \cdot \beta_o \cdot \left(q_o \frac{n_o^{\lambda_o}}{n_u^{\lambda_u} - n_o^{\lambda_o}} \right)^\xi}. \quad (7)$$

где $[\tau_u], [\tau_k], [\tau_o]$ – исходный, текущий и остаточный допустимые ресурсы;

W_u, W_k, W_o – объемы ТД, учтенные при оценке исходного, текущего и остаточного ресурса;

$\beta_u, \beta_k, \beta_o$ – коэффициенты дефектности, учтенные при оценке исходного, текущего и остаточного ресурса;

q_u, q_k, q_o – показатели коррозии и коррозионной стойкости, учтенные при оценке исходного, текущего и остаточного ресурса;

n_o – остаточный запас прочности.

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

–исходного:

$$\lambda_u = f(\Delta n_\sigma^u; \Delta n_e^u; \Delta n_N^u; \Delta n_\tau^u; \Delta n_t^u);$$

–текущего

$$\lambda_k = f(\Delta n_\sigma^k; \Delta n_e^k; \Delta n_N^k; \Delta n_\tau^k; \Delta n_t^k);$$

–остаточного

$$\lambda_o = f(\Delta n_\sigma^o; \Delta n_e^o; \Delta n_N^o; \Delta n_\tau^o; \Delta n_t^o),$$

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 ξ – степень опасности ТУ; μ – уровень значимости запаса прочности от степени нагруженности выбранного элемента ТУ; λ_n – достоверность 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.

Приведенные формулы дают основание полагать, что экспоненциальная зависимость (рисунок 4) 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, представ-

ляющие 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:

$$T_n = \min((T_u, T_k, T_o) - T_{Cn}), \quad (8)$$

где T_{Cn} – 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 машины.

Предположим, что $t_s = 20$ лет принят за нормативный, или определен по методике

[9], исходный запас прочности задан величиной $n_u = 2,0$ и рассчитаем ресурс по формуле (5).

На рисунке 4 покажем экспоненциальную зависимость ресурса при снижении запаса прочности от 2,0 до 1,0 и увидим, на какую величину через интервалы времени снижается ресурс [35].

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

Экспоненциальная зависимость (рисунок 4) показывает, что если n_k близко к единице, то и остаточный ресурс приблизится к предельно допустимой величине. Результат построения зависимости (рисунок 4) обосновывает применимость закономерности для расчета ресурса на различных этапах жизненного цикла единичных и уникальных машин.

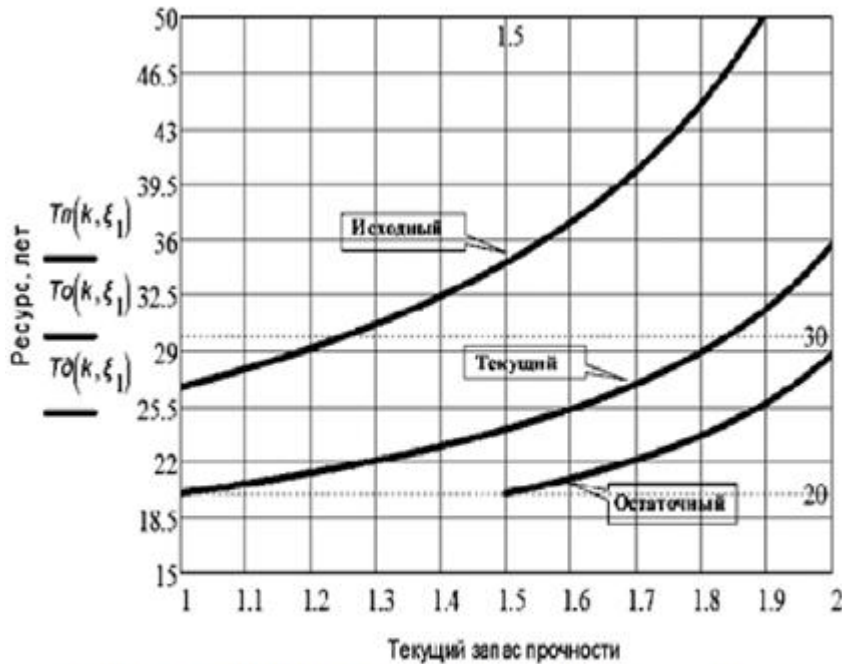


Рисунок 4 – Экспоненциальная зависимость ресурса от запасов прочности

В качестве примера (таблица 1) показан расчет коэффициента безопасности, запасов толщины стенки и ресурса корпуса ТУ. Предположим, что корпус изготовлен из листа с номинальной толщиной $S_n = 16$ мм с предельными отклонениями толщины $d_{s(-)} = 0,4$

мм и $d_{s(+)} = 0,15$ мм, которые учтены при изготовлении. Далее при снижении толщины стенки в процессе эксплуатации предельные отклонения толщины в расчете не учитывались, была учтена только ошибка измерения толщины $D_k = 0,6$ мм.

Расчеты показали, что при толщине стенки 12 мм и $n_k=1,52$ остаточный ресурс составит $T_k=28,1$ года. Если в процессе эксплуатации толщина стенки достигнет расчетной толщины $S_n=7,9$ мм, то запас толщины приблизится единице, соответственно и остаточный ресурс приблизится к предельно

допустимой величине, по окончании которого появляется риск выхода ТУ из строя. Поэтому, из соображений безопасности минимально допустимая толщина стенки может быть принята в пределах 10 мм при минимальном коэффициенте безопасности $K_k.=1,21$.

Таблица 1

Толщина стенки мм	Запас толщины стенки				Коэффициент безопасности			Ресурс, лет			
	Номинальный	Погрешность			Номинальный	Погрешность		Текущий	Погрешность ресурса		
S_k	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	5,47	10,13	20,18	5,81	63,6	89,8	48,2	48,8
14	1,77	1,87	1,70	4,82	4,40	6,06	3,54	41,9	49,2	37,6	13,8
12	1,52	1,61	1,44	5,63	2,31	2,87	1,97	30,4	33,9	28,1	9,6
10	1,27	1,36	1,19	6,75	1,39	1,67	1,21	23,6	25,8	22,0	8,2
7,9	1,00	1,09	0,92	8,54	0,85	1,01	0,74	18,4	20,1	17,2	8,0

Суммарная погрешность толщины с учетом предельных отклонений и ошибки измерения рассчитана по формуле:

$$\delta_s = (S_u \pm d_s) - (S_k \pm D_k).$$

Погрешности выражены как численными значениями, так и в процентном отношении для удобства сравнения.

Выводы:

1. Анализ преимуществ и недостатков современных методов прогнозирования ресурса позволил установить перспективность развития комплексных методов прогнозиро-

вания ресурса единичных и уникальных машин.

2. Комплексный метод прогнозирования проектного, исходного, текущего и остаточного ресурса направлен на снижение рисков разрушения машин.

3. Результаты работы показывают возможность применения единого методологического подхода к задаче проектирования единичных, уникальных машин на заданный ресурс.

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. Кумамото. 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. Электронный ресурс: <http://www.slaviza.ru/print:page,1,2062-standarty-dlya-zheleznodorozhnogo-transporta.html> (Дата обращения 20.10.2019).

7. Сосуды и трубопроводы высокого дав-

ления: 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. Деградация механических систем. – Новосибирск: Наука, 1998. – 320 с.

9. ДиОР 05. Методика диагностирования технического состояния и определения остаточного ресурса технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических производств Волгоград, 2006 г. (Дата обращения 25.12.2021) URL: http://gost.rf.com/norma_data/48/48689/index.htm

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», опубл. 2004.12.27.

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

20. Патент РФ №2390746 Способ без разборной 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. и 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 Университета (Государственный университет управления). – 2015. – № 7, – С. 188–193. Электронный ресурс: <https://cyberleninka.ru/article/v/ispolzovanie-metoda-ucheta-life-cycle-engineering-v-tselyah-kalkulirovaniya-zatrat> (дата обращения 30.10.2019).

28. N. Möller, “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. K. R. Varshney, “Engineering safety in

machine learning,” in Proc. Inf. Theory Appl. Workshop, La Jolla, CA, Feb. 2016.

30. H. Shimodaira. 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 №2454648, МПК G01M15/00, G01N3/00. Способ прогнозирования ресурса технических устройств // Черепанов А.П. Заявитель: Черепанов А.П. Опубл.: 27.06.2012, Бюл. № 18.

33. Cherepanov A.P. Selection of indicators for assessment of overall, computed, and re-

maintaining service lives of production equipment. // Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 46, Nos. 9–10, 2011, pp. 624-630(7).

34. Черепанов А.П., Порошин Ю.В. Компьютерная обработка результатов диагностирования сосудов, резервуаров и трубопроводов// Сб. тез. 3-й Междунар. конф. «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике». – М.: РОНКТД, 2002. – 270 с.

35. 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.

36. 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.