

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

СНИЖЕНИЕ РИСКА ВСЛЕДСТВИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЕДИНИЧНЫХ И УНИКАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Cherepanov A.P.

REDUCTION OF RISK DUE TO THE DESTRUCTION OF INDIVIDUAL AND UNIQUE TECHNICAL DEVICES

Аннотация. В статье отмечается, что снижение риска вследствие разрушения возможно априорной оценкой предельного технического состояния и степени деградации материала технического устройства. Идея заключается в использовании априорной информации о техническом состоянии и деградационных процессах, которые вызывают снижение прочности и снижение ресурса. Показано применение численных показателей коррозии, коррозионной стойкости материалов, степени износа и резерва прочности, дефектности, опасности разрушения и эффективности технического диагностирования на любой стадии жизненного цикла технического устройства. Приведено обоснование модели перехода к предельному состоянию. Применены численные показатели коррозии, коррозионной стойкости материалов, степени износа и резерва прочности, дефектности, опасности разрушения. Показана возможность разработки рекомендаций на ремонт, усиление или замену изношенных элементов единичных и уникальных технических устройств различного конструктивного исполнения.

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

Abstract. The article notes that reducing the risk due to destruction is possible by an a priori assessment of the maximum technical condition and the degree of degradation of the material of the technical device. The idea is to use a priori information about the technical condition and degradation processes that cause a decrease in strength and a decrease in resource. The application of numerical indicators of corrosion, corrosion resistance of materials, the degree of wear and reserve strength, defects, the risk of destruction and the effectiveness of technical diagnostics at any stage of the life cycle of a technical device is shown. The justification of the model of transition to the limit state is given. Numerical indicators of corrosion, corrosion resistance of materials, the degree of wear and reserve strength, defects, and the risk of destruction are applied. The possibility of developing recommendations for repair, strengthening or replacement of worn-out elements of individual and unique technical devices of various designs is shown.

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

Единичные и уникальные технические устройства (ТУ) опасных производств, включая емкости, теплообменники, колонны, скрубберы, реакторы, резервуары, котлы, трубопроводы и др. должны быть безопасными в течение всего срока службы в соответствии с [1].

Риск вследствие разрушения таких ТУ, с одной стороны, обусловлен тем, что они не содержат элементов резервирования, с другой стороны, невозможно определение их надежности наработкой на отказ, как, например, изделий серийного производства. Выход из строя хотя бы одного элемента технического устройства, в том числе и при

штатных режимах эксплуатации, требует прекращения работы всей технологической установки с немедленным отключением ее от источника давления и температуры для предотвращения аварии. Поэтому снижение риска аварий согласно требованиям [2, 3] состоит в нормативно обоснованном принятии конструктивных, технологических и эксплуатационных решений на всех стадиях жизненного цикла, включая проектирование, изготовление, эксплуатацию, контроль и диагностику. При этом необходимо учитывать: отклонения параметров конструкции и режимов эксплуатации; перегрев; превышение давления; повреждения, связанные с отло-

жением примесей рабочей среды на внутренних поверхностях элементов; коррозию или иные виды износа поверхности элементов, деталей и узлов. Вероятность разрушения ТУ и математическое ожидание ущерба оценивают условиями эксплуатации, характеристиками прочности, надежности и живучести для штатных (нормальных) и нештатных (аварийных) ситуаций техническим состоянием, определением ресурса и назначением срока службы [4]. Однако, вероятностные методы исследования из-за их сложности и невысокой достоверности оценки снижения прочности вследствие развивающихся при эксплуатации деградиационных процессов металла не нашли широкого практического применения. В частности, определение ресурса и срока службы единичных и уникальных ТУ вероятностными моделями теории надежности, например, по наработке на отказ в соответствии с методическими указаниями [5], не нашло практического применения, и в настоящее время эти методические указания отменены.

Выбор критериев предельных состояний материалов конструкции в зависимости от характеристик рабочих сред и параметров, расчеты прочности, исследование напряженно-деформированного состояния в настоящее время осуществляются стандартами и нормативами [6, 7, 8], которые применимы преимущественно для проектируемых ТУ по расчетным толщинам стенок. Расчет элементов технических устройств, бывших в эксплуатации по фактическим толщинам стенок, определяемым техническим диагностированием (ТД), по этим стандартам возможен, но в них не содержатся конкретные рекомендации по предельно допустимым (отбраковочным) толщинам, которые регламентированы для каждого вида ТУ, например, нормативами [9].

Согласно [1] ТУ должно соответствовать действующей на момент проведения работ по оценке технического состояния, нормативной документации, в том числе и нормам расчета на прочность. Например, согласно техническому паспорту устройства, изготовленного 10 лет назад, расчеты прочности были выполнены в соответствии со стандартами [9, 11].

Если устройство было изготовлено раньше, то оно соответствовало еще ранее действующим нормам и стандартам (например, ГОСТ 14249 Сосуды и аппараты. Нор-

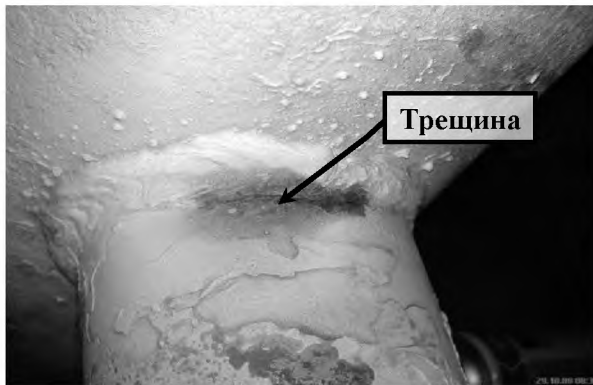
мы и методы расчета на прочность). Это означает, что расчеты на прочность, приведенные в паспорте технического устройства, будут считаться недействительными, поэтому их необходимо будет привести в соответствие с введенными с 1 августа 2018 года стандартами [6, 7, 8] взамен ранее действующих. Следовательно, на момент проведения работ по оценке технического состояния (ТС) расчеты прочности должны соответствовать стандартам [6, 7, 8].

Фактическое ТС, как известно, оценивают средствами ТД с определением деградиационных процессов оценкой напряженно-деформированного состояния, например, в местах сопряжения элементов между собой, коррозионных повреждений, язв, трещин и иных дефектов, а также по результатам анализа технической документации. Оценку параметров ТС и доминирующего механизма повреждения проводят анализом результатов ТД, совокупности характеристик материала, коэффициентов запаса прочности и технологических условий эксплуатации. Выделяют преобладающие деградиационные процессы, приводящие к потере работоспособности ТУ, в том числе, механическое, коррозионное, эрозионное, кавитационное, усталостное, коррозионно-механическое и окислительное водородное, электроэрозионное и другое изнашивание. Одной из важных характеристик, определяющих надежность и срок службы ТУ, является коррозионная стойкость конструкционного материала [11].

Анализ эксплуатационных факторов, действующих на металл, позволяет выделить следующие деградиационные процессы: разупрочнение как следствие длительного пребывания металла при высокой температуре; циклическое воздействие нагрузок, которое вызывает концентрацию напряжений, ускоряющих развитие повреждаемости металла; охрупчивание как следствие изменения физико-механических свойств материала, которое снижает трещиностойкость и приводит к внезапному разрушению. В зависимости от механизма деградиационного процесса различают следующие виды предельных состояний материала: вязкое, усталостное или кратковременное хрупкое разрушение, пластическую деформацию и ползучесть.

Определяющими параметрами, приводящими к перечисленным видам предельных состояний, являются фактические механические свойства конструкционных материалов,

степень поражения коррозией, количество, размеры повреждений и дефектов, напряженно-деформированное состояние элементов конструкции в зонах дефектов [12] и их опасности. В качестве примера образования дефекта в виде трещины на рисунке 1 показан фрагмент врезки патрубка в обечайку.



патрубка к обечайке с трещиной

При монтаже байпасной линии, подключенной к штуцеру, не был проведен контроль механических напряжений и не исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) в зоне врезки штуцера и в сварном шве с учетом действующих радиальной нагрузки на штуцер, в результате которой напряжения в сварном шве превысили допустимые, и в зоне наибольшей их концентрации образовалась трещина.

После обнаружения пропуска был проведен контроль сварного шва цветным методом дефектоскопии. Путем исследования НДС и определения фактических напряжений при монтаже, возможно, удалось бы предотвратить разрушение сварного шва в процессе эксплуатации.

На рисунке 2 показан фрагмент технологического трубопровода с трещиной в зоне расслоения металла стенки. Разрушение стенки произошло при проведении пропарки (очистки внутренней полости трубопровода от отложений с помощью пара, подаваемого под давлением).

Металлографические исследования показали, что разрыв стенки произошел в зоне наибольшего ее утонения, вызванного расслоением металла, которое происходило при постепенном развитии возможного металлургического дефекта прокатки. Остаточная толщина в зоне расслоения составила не бо-

лее 2 мм, которая еще могла выдерживать рабочее давление среды 0,5 МПа, но при резком повышении давления пара и разности температур изнутри и снаружи стенки, произошел ее разрыв.



Рисунок 2 - Фрагмент технологического трубопровода диаметром 250 мм с трещиной в зоне расслоения стенки
Рисунок 1 - Фрагмент сварного шва приварки

Можно предположить, что металлургического дефекта расслоения на внутренней поверхности первоначально не было, если учесть, что трубопровод эксплуатировался в течение длительного времени, а затем был остановлен и не эксплуатировался достаточно продолжительное время (несколько лет). Поскольку расстояние между подвесками трубы составило 4 метра, то за счет собственного веса участок трубы имел некоторый прогиб и одновременно с нормальными напряжениями изгиба по вертикальной оси, в горизонтальном направлении сечения создавались и касательные напряжения, которые вначале вызвали образование незначительной трещины по внутренней поверхности. Далее из-за отсутствия в трубопроводе продукта при перепадах температуры внутри образовывался конденсат влаги, который попадал в эту трещину и при замерзании в полости трещины образовывался лед. При многократном воздействии на металл стенки, лед все больше разрывал металл, трещина увеличивалась, соответственно, увеличивалась длина и ширина расслоения.

В итоге перед проведением пропарки остаточная толщина стенки в зоне трещины осталась всего 2 мм и при резкой подаче пара и резком увеличении давления в трубе именно на этом участке трубопровода произошел разрыв стенки. Появляется вопрос, возможно

ли в принципе было обнаружение дефекта расслоения на этом участке трубопровода?

Ответить на него однозначно нельзя, ведь снаружи дефект был невидим. Поэтому обнаружить расслоение стенки внутренней поверхности из-за большой протяженности и загрязненной внутренней полости трубы, например, эндоскопированием вряд ли бы удалось. Дефект оказался сложным, его определение возможно было, например, одним из современных методов контроля - ультразвуковым сканированием.

Появление подобных дефектов вызвано множеством причин, но основными являются не обнаруженные своевременно дефекты, образующиеся как в процессе изготовления, так и при эксплуатации из-за недостаточности объемов входного контроля и объемов оценки фактического ТС из-за наличия труднодоступных мест.

Определение технического состояния и оценка остаточного ресурса, как отмечается в методических рекомендациях [12] и в работах [4, 13, 14], достигается на основе параметров и критериев предельного состояния, механизмов деградации (старения) механических свойств материалов и изменения функциональных показателей. Следует отметить, что показатели коррозии и коррозионной стойкости металлов, приведенные в стандарте [11] не имеют численных значений и пригодны только для использования их при визуально-измерительном контроле.

Для оценки ресурса с применением расчетных формул [4] необходимы численные величины показателей коррозии и коррозионной стойкости металлов, которые предстоит разработать и обосновать. Качество и достоверность определения технического состояния зависит от полноты диагностирования и собранной информации о техническом устройстве за весь период его эксплуатации. Оценка фактического и прогнозирование будущего технического состояния зависит от качества и полноты технической документации на технические устройства, поэтому немаловажную роль уделяют ее изучению и анализу.

Паспорт, проектная документация, рабочие чертежи, документация заводов-изготовителей с приложением сертификатов на примененные материалы, комплектующие и др., монтажная документация, расчеты на прочность, расчет температурных и иных нагрузок и воздействий, результаты геодезиче-

ской съемки и геологических исследований – далеко не полный перечень документации, подлежащий изучению анализу.

Анализируют также результаты контроля образцов-свидетелей металла и сварных швов, уплотнительных элементов конструкции, визуально-измерительного контроля в период эксплуатации, документы, подтверждающие изменение проектных параметров и нагрузок, документация на контрольно-измерительные и предохранительные устройства. Анализируется эксплуатационная документация, меры, принятые для устранения их последствий, а также документация по отказам и повреждениям аналогичных ТУ [12].

Результаты анализа технической документации оформляют в виде отчета, который содержит: перечень изученной технической документации; информацию о соответствии фактических нагрузок и режимов эксплуатации требованиям проектной и эксплуатационной документации; анализ причин и последствий отказов, повреждений и аварий.

Дается подтверждение соответствия расчетов на прочность элементов конструкции по проектной документации, по фактическим условиям и режимам эксплуатации согласно действующей нормативно-технической документации [1] и выполняются прочностные расчеты с применением [6, 7, 8]. Указывается объем дефектоскопического контроля в период изготовления, монтажа и ремонтных работ, проводимых в период эксплуатации. Приводится оценка параметров, определяющих предыдущее ТС, критерии их оценки, методы определения и численные значения, механизмы деградации (старения) материалов конструкции, перечень элементов, которые в наибольшей степени предрасположены к появлению повреждений и дефектов [12].

На основе актов и заключений по предыдущему техническому состоянию разрабатывают программу технического диагностирования, в которой указывают рекомендации по объему дефектоскопического контроля, толщинометрии, определению мест повреждений и дефектов, и пр. Указывают необходимость установления степени деградации материалов конкретных элементов, дают рекомендации относительно необходимости дополнения технической документации (журналов контроля температуры, давления, режимов смены уровня эксплуатационных

нагрузок). Разрабатывают программу (план) оперативной (функциональной) диагностики.

Система оценки показателей надежности, остаточного ресурса, снижения риска и требований безопасности рассмотрена в работах [4, 13]. Прогнозирование ресурса по методу определения «слабейшего звена» технического устройства рассмотрено в работе [14].

Несмотря на большое количество фундаментальных научных работ по методам прогнозирования ресурса, в том числе [13], на практике применяется оценка одного вида ресурса - остаточного ресурса, что не обеспечивает снижения риска разрушения ТУ при эксплуатации. Методические указания [12] содержат ограничения по назначению сроков безопасной эксплуатации только на основании скорости коррозии, определяемой по предыдущему периоду эксплуатации. В них не обоснованы другие показатели, которые бы учитывали деградиционные процессы, в том числе степень износа и запасы на износ на последующий период эксплуатации.

Как показал анализ работ [15, 16, 17] и многолетняя практика применения методических рекомендаций [12], преимущественно по этим причинам они обусловлены погрешностями оценки остаточного ресурса от 50% до 114%, как отмечалось в работах [15, 16], что повышает риск разрушения ТУ при эксплуатации.

Столь высокие погрешности вызваны тем, что:

- не предусмотрена оценка ресурса узлов, деталей и элементов в зонах их сопряжения между собой по методу слабейшего звена;

- из всех показателей коррозии и коррозионной стойкости металлов, приведенных в стандарте [11], учитывается только скорость коррозии, ползучести и количество циклов;

- не учитывается степень износа при изменении толщин стенок или площади сечений узлов, деталей и элементов, подверженных одному или нескольким механизмам повреждения, например, коррозии, эрозии, усталости, ползучести, изменению механических свойств и химического состава материала и др.;

- не указываются методы определения фактических величин механических напряжений в переходных зонах, в сварных швах и в зонах дефектов, которые необходимы для определения допустимых величин коэффи-

циентов концентрации напряжений и опасности дефектов;

- в них не нашли свое отражение показатели дефектности, приведенные в работе [17];

- отсутствуют рекомендации по оценке ресурса в зависимости от запасов прочности узлов, деталей и элементов технических устройств;

- не учитываются группы или классы опасности, полнота, объемы и достоверность технического диагностирования узлов, деталей и элементов технических устройств;

- отсутствуют требования к расчету прочности и к разработке мероприятий по замене изношенных или усилению ослабленных элементов, которые необходимы для восстановления работоспособности ТУ в период ремонта;

- отсутствуют рекомендации по необходимости замены изношенных или усилению ослабленных узлов, деталей и элементов, рекомендации по расчету прочности ресурса заменяемых изношенных или усиливаемых узлов и деталей.

Как видно из работ [13, 14], анализ и априорная оценка развития деградиационных процессов требует переработки больших объемов информации, поэтому документация на бумажных носителях снижает оперативность принятия решений по срокам и объемам их ремонта, а также по назначению и определению периодов между ремонтами. Переработка таких объемов информации возможна только современными средствами вычислительной техники и компьютерными программами. При классическом подходе к составлению компьютерных программ получают результат расчета всего лишь одного элемента конструкции [18], а для расчета прочности другого элемента требуется повторный ввод исходных данных и оформление нового расчета, в этом случае технический проект, например, на аппарат колонного типа выглядит в виде многотомного документа. Отсюда очевидна и неэффективность использования таких программ. Разработка программ для расчета прочности множества разнотипных узлов аппаратов (обечак корпусов, днищ, крышек, штуцеров, укрепляющих элементов и т.п.) представляет особую сложность. Такая задача решалась прикладными программами PVD-Desing (разработчик-ОАО «ВНИИНЕФТЕМАШ», г. Москва)

[19], но в них отсутствовал расчет ресурса различного конструктивного исполнения ТУ.

Очевидно, что для снижения риска, 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.

Анализ показал, что работы [12, 15, 16, 17] направлены на определение только остаточного ресурса. Достоверная оценка исходного, фактического и предельного состояний с определением полного, исходного и остаточного ресурса единичных и уникальных ТУ различного конструктивного исполнения не решена по ряду причин.

1. Высоки погрешности (от 50% до 114%) определения остаточного ресурса [15,16], которые вызваны отсутствием:

- метода сравнения априорной информации исходного с фактическим техническим состоянием и деградиационными процессами, степени износа за прошедший период эксплуатации и запаса на износ на последующий период эксплуатации для определения ресурса на любой стадии жизненного цикла технических устройств;

- метода исследования закономерности перехода исходного к фактическому состоянию, и далее к предельному состоянию;

- метода исследования деградиационных процессов, развивающихся на протяжении жизненного цикла, начиная от исходного до достижения предельного технического состояния.

2. Риск при эксплуатации вызван:

- недооценкой качества, объемов технического диагностирования, степени износа и запаса на износ на последующий период эксплуатации, дефектности и степени опасности разрушения;

- недостаточным учетом времени на техническое диагностирование, оценку технического состояния и ресурса при планировании остановочных ремонтов и экспертизы промышленной безопасности;

- недостаточным учетом фактических величин механических напряжений и коэффициентов их концентрации в переходных зонах и в зонах дефектов;

- отсутствием методов расчета прочности и ресурса с учетом численных показателей коррозии и коррозионной стойкости материалов, степени износа, дефектности, опасности разрушения, запасов прочности, эффективности технического диагностирования, использования априорной информации о техническом состоянии, развитии деградиационных процессов и снижении прочности;

- отсутствием методов проектирования ТУ на заданный ресурс единичных и уникальных ТУ различного конструктивного исполнения;

- недостаточным комплексным сопровождающим контролем фактического технического состояния всего оборудования технологических комплексов и установок;

- недостаточным анализом технической документации, учетом условий и вероятности отказов в период эксплуатации;

- отсутствием методов исследования деградиационных процессов для оценки закономерности снижения исходного, фактического, предельного технического состояния и определения ресурса безопасной эксплуатации в условиях увеличенного интервала между ремонтами;

- отсутствием методик для обоснованного назначения сроков безопасной эксплуатации всего технологического комплекса, состоящего из единичных и уникальных ТУ опасных производств.

3. Обработка информации с применением современной компьютерной техники [18,19] не рассмотрена по следующим причинам:

- недостаточно автоматизирована комплексная обработка и исследование данных по техническому диагностированию, оценке исходного, фактического, предельного технического состояния и прогнозированию ресурса;

- отсутствует единая платформа для осуществления связи между результатами технического диагностирования, оценкой технического состояния и прогнозированием ресурса;

- недостаточна оперативность между подразделениями, выполняющими отдельные функции по диагностированию, включая дефектоскопический и визуально-измерительный контроль, прочностные расчеты, оформление документов по техниче-

скому состоянию и по экспертизе промышленной безопасности.

Оценка полного, исходного и предельного ресурса и математические зависимости для их определения, изложенные в работе [4], смогут в достаточной степени снизить риск, вызванный ошибками проектирования и изготовления, при эксплуатации единичных и уникальных ТУ.

Концепция оценки полного, исходного и остаточного ресурса ТУ с учетом полноты и объемов технического диагностирования изложена в работе [20]. Определение фактических величин механических напряжений и коэффициентов их концентрации в переходных зонах и в зонах дефектов методами их непосредственного измерения предусмотрено [21].

Основными показателями для оценки ресурса в [22, 23] 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 приняты объемы технического контроля и диагностирования элементов, длины сварных швов и относительной площади поверхности элементов [24].

Снижение риска разрушения, как показано в работе [13], возможно применением уточненных методов определения коэффициента безопасности на остаточный ресурс. Зависимость, обоснованная моделью [25], вполне может обеспечивать приемлемую для практики точность оценки ресурса при использовании исходных, текущих и прогнозируемых значений запасов прочности или запасов толщин стенок, определенных прочностными расчетами.

В работе [4] дано определение 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 дано определение степени износа через коэффициенты физического износа и ТС элементов ТУ.

Снижение прочностных характеристик, выраженных через запасы прочности, как

показано в работе [25], принято в качестве износа, определяемого разностью:

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

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

Величина $\Delta n_u/n_n$, принята за допустимый совокупный износ.

Полный износ определим разностью между исходным и нормативным запасами прочности:

$$\Delta n_n = n_u - n_n$$

Разделив полный износ на нормативный запас прочности, получена степень износа, выраженная формулой:

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

где ΔT – допустимый период эксплуатации.

Снижение запаса прочности за предыдущую эксплуатацию выражено разностью:

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

где n_k – текущий запас прочности.

Тогда, как и в предыдущем случае, степень износа за период эксплуатации до текущего ТД определяется формулой:

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

где T_{k+1} – период эксплуатации до текущего ТД.

Предполагая, что в дальнейшем износ будет таким же, закономерность его снижения может быть определена износом на последующий период. Отношение $n_k/\Delta n_k$ принято для последующего периода эксплуатации. В работе [13] введено понятие коэффициента безопасности. В данном случае коэффициент безопасности на последующий период можно определить формулой:

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

где T_{k-1} – период эксплуатации после текущего ТД.

Таким образом, коэффициент безопасности определяет степень износа на последующий период времени эксплуатации после текущего ТД.

Используем формулы (1÷3), предложенные в работе [26] для определения ресурса на различных этапах жизненного цикла по формуле:

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

где $[\tau]$ – допускаемый срок эксплуатации.

Величину запаса по ресурсу, приведенную в работе [13], можно принять в качестве условия:

$$[\tau]_{пред}^s = f(n_{\tau u}, n_{\tau k}, n_{\tau o}),$$

где $n_{\tau u}, n_{\tau k}, n_{\tau o}$ – исходный, текущий и остаточный запасы по ресурсу.

Ресурс с условной вероятностью (4) достижения предельного состояния на протяжении всего жизненного цикла ТУ, и выразим как:

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 допускаемые ресурсы; W_u, W_k, W_o – объемы ТД при оценке исходного, текущего и остаточного ресурса; $\beta_u, \beta_k, \beta_o$ – коэффициенты дефектности [17], учтенные при оценке исходного, текущего и остаточного ресурса; q_u, q_k, q_o – показатели коррозии и коррозионной стойкости [26], учтенные при оценке исходного, текущего и остаточного ресурса; n_o – остаточный запас прочности; ξ – степень опасности ТУ [24].

Вероятностный параметр достоверности оценки запаса прочности по напряжениям, деформациям, числу циклов, времени и температурам [25], принятый для:

–исходного:

$$\lambda_n = f(\Delta n_\sigma^n; \Delta n_e^n; \Delta n_N^n; \Delta n_\tau^n; \Delta n_t^n);$$

–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 μ – загруженность выбранного элемента ТУ;

λ_n – вероятностный параметр достоверности оценки запаса прочности по напряжениям, деформациям, числу циклов, времени и

температурам, соответственно.

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

Проведенные формулы (5÷8) дают основание полагать, что экспоненциальная зависимость [40] отражает жизненный цикл ТУ от изготовления до достижения предельного ТС с учетом износа и изменения расчетных характеристик.

Таким образом, снижение риска разрушения может быть реализовано с использованием формул (5÷8) на любом этапе от проектирования до достижения предельного состояния.

При определении рисков разрушения ТУ должны также 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 [23], 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 ТУ.

Обработка информации с применением современной компьютерной техники, показанная в работе [27] дает возможность создать автоматизированную комплексную обработку и исследование данных по техническому диагностированию, оценке исходного, фактического, предельного технического состояния и прогнозированию ресурса. Она также позволяет создать единую платформу для осуществления связи между результатами технического диагностирования, оценкой технического состояния и прогнозированием ресурса и повысить оперативность между подразделениями, выполняющими отдель-

ные функции по диагностированию, включая дефектоскопический и визуально-измерительный контроль, прочностные расчеты, оформление документов по техническому состоянию и по экспертизе промышленной безопасности.

Из изложенного следует, что разработка методов снижения риска вследствие разрушения и деградационных процессов является актуальной фундаментальной научной задачей, направленной на снижение риска единичных и уникальных ТУ различного конструктивного исполнения.

Выводы:

1. Метод прогнозирования проектно-

го, исходного, текущего и остаточного ресурса направлен на снижение рисков разрушения ТУ.

2. Метод, на базе которого возможен единый методологический подход к задаче снижения риска, сдерживается отсутствием общепринятой концепции, единого подхода к технологии ресурсно-прочностных исследований деградационных процессов

3. Метод снижения риска разрушения ТУ может осуществляться при проектировании на заданный ресурс, что наиболее полно отвечает обеспечению надежности, безопасности эксплуатации и экономичности при производстве единичных и уникальных ТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением». Утв. Приказом Ростехнадзора от 25.03.2014 N 116 (Зарегистрировано в Минюсте России 19.05.2014 № 32326).
2. Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности. Утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 27 декабря 2013 г. № 646.
3. ГОСТ Р 54124—2010. Безопасность машин и оборудования. Оценка риска. – М.: Стандартинформ, 2010.
4. 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.
5. РД 26.260.004-91. Методические указания прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации.
6. ГОСТ 34283-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность при ветровых, сейсмических и других внешних нагрузках. – М.: Стандартинформ, 2018.
7. ГОСТ 34347-2017 Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018.
8. ГОСТ34233.1÷12-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сборник стандартов. – М.: Стандартинформ, 2018.
9. СТО-СА-03-004-2009. Трубчатые печи, резервуары, сосуды и аппараты нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Требования к техническому надзору, ревизии и отбраковке. / Ассоциация «Ростехэкспертиза»: ОАО «ВНИКТИнефтемашиностроение». Волгоград: Изд. ВГПУ «Перемена», 2010.-156 с.
10. ГОСТ Р 52857.1–2007 ÷ ГОСТ Р 52857.12—2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сборник стандартов)
11. 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.
12. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов. РД 03-421-01.
13. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. – Ч. 1: Критерии прочности и ресурса. – 494 с. – Ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с. – Новосибирск: Наука, 2005.
14. 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. – 334 с.

15. Агафонов В.В., Пилин Б.П., Мирочник В.Л. и др. Некоторые проблемы применения рекомендаций РД 03-421-01 при определении остаточного ресурса сосудов и аппаратов после длительной эксплуатации. Ж. «Безопасность Труда в Промышленности» № 11-2008 г., стр. 45-50.
16. 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.
17. Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник / А.М. Кузнецов, В.И. Лившиц и др. Изд. 2-е, дополненное. Иркутск: Издание ГП "Иркутская областная типография №1", 1999. 600 с.
18. Краснокутский А.Н., Кабо Л.Р., Трифонов Ю.Ю. Программа расчета сосудов и аппаратов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 5. – С. 28–31.
19. Пакет прикладных программ «PVP-Design» (разработчик – ОАО «ВНИИНЕФТЕМАШ», г. Москва). Краткое руководство. – 2007. – 99 с. URL: <http://upoural.ru/news/104.html> (дата обращения: 03.06.2008).
20. 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.
21. ГОСТ Р 53965-2010 Контроль неразрушающий. Определение механических напряжений. Общие требования к классификации методов.
22. 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.
23. 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).
24. 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.
25. Черепанов А.П. Обоснование модели ресурса технических устройств // Вестник машиностроения. 2020. № 6. С. 7-12.
26. 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.
27. Колмаков В.П., Черепанов А.П., Порошин Ю.В., Вуйцик В.З. Комплекс компьютерной обработки результатов технического диагностирования // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 7. – С. 59–63.