

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

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЕТОВ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСНО-ПРОЧНОСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Cherepanov A.P.

### AUTOMATED COMPLEX OF STRENGTH CALCULATIONS AND RESOURCE-STRENGTH RESEARCH OF TECHNICAL DEVICES

**Аннотация.** В статье рассмотрена возможность применения автоматизированного комплекса расчетов прочности и проведения ресурсно-прочностных исследований при экспертизе промышленной безопасности технических устройств химических и нефтехимических производств. Идея автоматизированного комплекса заключается в использовании априорной информации о техническом состоянии и деградиционных процессах, которые вызывают снижение прочности и снижение ресурса, который дает возможность визуализации хода расчета, его результатов и анализа ситуации при изменении эксплуатационных и конструктивных параметров. Использование гибкой системы построения расчетных модулей и их автоматическое подключение в зависимости от типа сосуда или аппарата, количества и типа входящих в него элементов, в зависимости от его конструктивных особенностей (наличия укрепляющих элементов) сокращает время проведения ресурсно-прочностных исследований и разработки проекта экспертного заключения.

**Ключевые слова:** автоматизация, безопасность, деградиация, диагностирование нагрузки, остаточный ресурс, ресурсные и прочностные исследования, прочность, риск, техническое состояние, экспертиза.

**Abstract.** The article considers the possibility of using an automated complex of strength calculations and carrying out resource-strength studies in the examination of industrial safety of technical devices of chemical and petrochemical industries. The idea of an automated complex is to use a priori information about the technical state and degradation processes that cause a decrease in strength and a decrease in resource. allows you to visualize the calculation progress, its results, and analyze the situation when changing operational and design parameters. The use of a flexible system for constructing calculation modules and their automatic connection, depending on the type of vessel or apparatus, the number and type of elements included in it, depending on its design features (the presence of reinforcing elements), reduces the time spent on resource and strength research and development of the expert design.

**Keywords:** automation, safety, degradation, load diagnostics, residual resource, resource and strength studies, risk, technical condition, strength, expertise.

Рассмотрим возможности применения автоматизированного комплекса расчетов прочности и ресурсно-прочностных исследований технических устройств (комплекс РПИ) при экспертизе промышленной безопасности технических устройств (ТУ) опасных производств.

Расчеты прочности сосудов и аппаратов, применяемых в химической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности согласно [1] проводятся по условиям выбора механических характеристик материалов элементов в зависимости от перерабатываемых сред и технологических параметров эксплуатации. Там же содержатся

общие требования, расчет на прочность обечаек и днищ при нагрузках на штуцер, герметичность фланцевых соединений, обечаек и днищ при воздействии опорных нагрузок, расчеты при статических и малоцикловых нагрузках, а также расчеты прочности аппаратов колонного типа, сосудов с рубашками, теплообменных аппаратов и т.п. Нормы и методы расчета на прочность при ветровых, сейсмических и других внешних нагрузках регламентированы стандартом [2]. Требования к форме представления таких расчетов, выполняемых компьютерами, регламентируются стандартом [3], в частности им установлены требования к содержанию, оформ-

лению и формам представления расчетов, выполняемых по [1, 2]. Там же говорится, что следует использовать программы, полностью соответствующие применяемым стандартам, содержащие четко разграниченные разделы, соответствующие им, а расчетные зависимости должны в точности соответствовать [1, 2].

Ответственность за программы лежит на их разработчиках, а пользователь ответственен за выбор и корректное применение программ и правильность вводимых им исходных данных. Объем расчетов должен быть достаточным для получения полных данных о температурных полях, напряженно-деформированном состоянии, прочности, устойчивости и других параметрах, оценка которых являлась целью расчета [3].

Для решения этих задач в настоящее время имеются компьютерные программы ПАССАТ [4] и PVP-Design [5]. Расчеты по ним могут использоваться на разных этапах жизненного цикла промышленного объекта: в процессе проектирования сосуда (аппарата), во время проектирования технологической установки, при проведении экспертизы промышленной безопасности оборудования в процессе эксплуатации. В их состав входит ряд модулей расчета различных сосудов и аппаратов.

Рассмотрим особенности экспертизы промышленной безопасности, проводимой в соответствии с нормативами [5, 6] при которой необходима обработка результатов технического диагностирования с оформлением протоколов и актов технического контроля, связь их с расчетами прочности и с экспертным заключением, чего компьютерными программами [4, 5] не предусмотрено.

В работе [8] показана блок-схема алгоритма компьютерной обработки результатов диагностирования и прогнозирования ресурса, расчетов прочности и ресурса, бывших в эксплуатации ТУ (рисунок 1). Последовательностью заданной алгоритмом, блоками 1÷6 проводятся: анализ технической документации, параметры эксплуатации, предыдущих ТД и паспортные сведения о ТУ, которые аккумулируются и вводятся в карты исходных данных. Заполняются протоколы дефектоскопического контроля и проводится анализ результатов ТД? по которым оценивается фактическое состояние

элементов ТУ [9]. Блоком 2 определяется риск при разрушении (группа или класс опасности), которыми характеризуется ТУ по параметрам эксплуатации, степени опасности применяемых или хранимых веществ, представляющих опасность для окружающей среды. Блоками 7, 11 определяется объем и эффективность ТД. Блоками 8÷10 выбираются модули расчета прочности согласно [1, 2] и проводится расчет прочности элементов. Блоком 12 определяются запасы прочности. Ресурсно-прочностные исследования (РПИ) проводятся блоками 13÷16 по запасам прочности ослабленных элементов. Блоком 17 устанавливается доля ресурса, исчерпанного на предшествующих стадиях эксплуатации с учетом замененных или усиленных элементов. Блоком 18 определяется ресурс и назначается срок последующей эксплуатации ТУ. Далее по результатам РПИ назначается срок безопасной эксплуатации разрабатывается экспертное заключение.

Как видно из блок-схемы (рисунок 1) обработка данных ТД и результатов РПИ связана с еще большим массивом данных, чем расчеты по программам [4, 5], поскольку наряду с расчетами прочности проводится обработка результатов ТД, проводится РПИ, оценка ресурса каждого элемента, всего ТУ и оформление экспертных заключений.

Структурная схема комплекса РПИ, реализующая алгоритм, показана на рисунке 2.

Реализация функций алгоритма включает выбор расчетных схем в зависимости от типа, конструктивного исполнения и количества элементов ТУ [10].

Комплекс РПИ построен по модульному принципу с гибкими связями между ними и соответствующими операторами. Весь комплекс состоит из трех операторов: подготовки исходных данных, расчета и анализа условий прочности и устойчивости, расчета прочности замененных или усиленных элементов и подготовки проекта экспертного заключения.

Оператор подготовки исходных данных содержит дистрибутивы файлов – шаблонов протоколов, библиотеку рисунков элементов и узлов ТУ. Заполненные протоколы составляют блок актуализированных документов ТД в электронном виде.

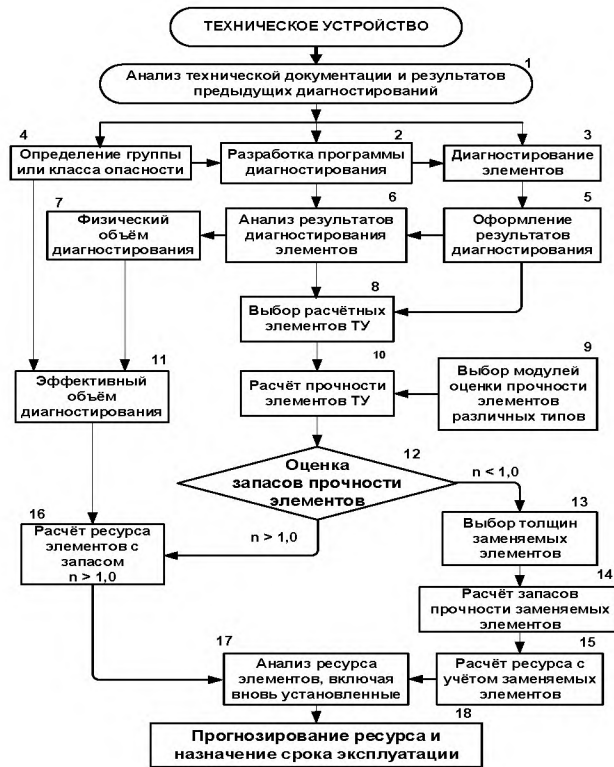


Рисунок 1 - Блок-схема алгоритма обработки результатов диагностирования и прогнозирования ресурса

Оператор расчета и анализа прочности содержит дистрибутив и библиотеку файлов – шаблонов, автоматически выбираемых для заданных конструктивных элементов ТУ, по которым проводят расчет прочности и определяют запасы прочности. По запасам прочности устанавливают необходимость их усиления или замены, изношенных в процессе эксплуатации, элементов. Затем определяется остаточный ресурс элементов, а по наименьшему ресурсу по методу «слабейшего звена» [11] определяется ресурс всего ТУ.

Оператор подготовки проекта экспертного заключения также включает дистрибутив файлов – шаблонов, которые выбираются автоматически в зависимости от конструкции и типа ТУ, а далее из них формируется проект экспертного заключения с предписаниями, рекомендациями о режимах дальнейшей эксплуатации и назначается срок безопасной эксплуатации ТУ [6].

В комплексе РПИ для обработки множества данных о характере повреждений, разрушений или отказов описывается формализованным конечным набором свойств и параметров, предложенным в работе [12].

Соответствующие расчетные модули задаются вручную или выбираются автоматически в зависимости от конструктивного исполнения ТУ, которое может быть аппаратом колонного типа, горизонтальной или вертикальной емкостью, или теплообменником.

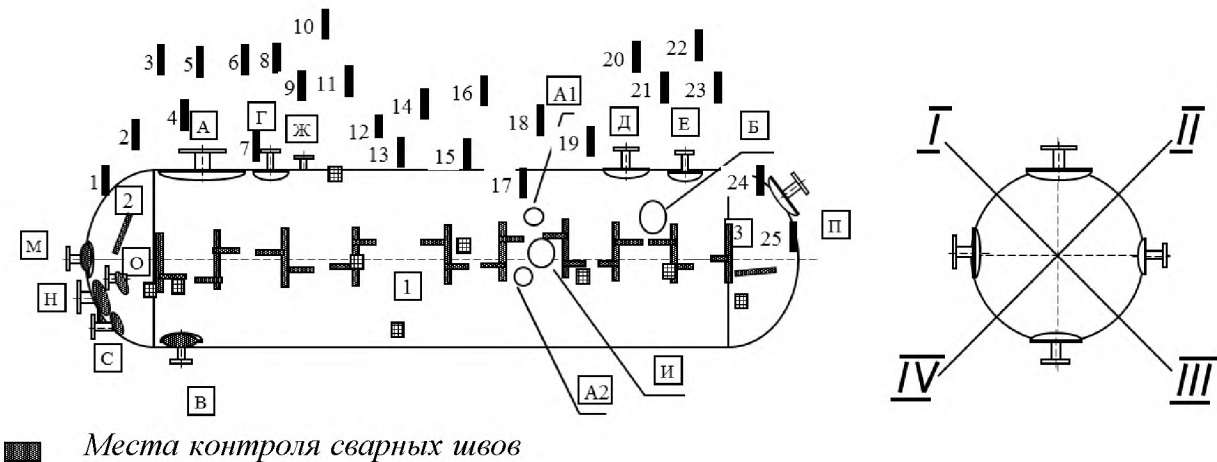


Рисунок 2 - Структурная схема комплекса ресурсно-прочностных исследований сосудов и аппаратов

Фрагмент карты исходных данных горизонтального сосуда показан на рисунке 3. Карта исходных данных является электронным аналогом технического паспорта, куда занесены технологические параметры (давление, температура, среда), габаритные размеры, размеры узлов и деталей, а также материалы из которых они изготовлены [13, 14]. При этом каждый элемент сосуда занимает, как в карте, так и в расчетах по одной строке. В карте приводится количество частей из которых состоит корпус сосуда, стандартных размеров листа проката, исходя из раскроя при его изготовлении. Сюда же входит суммарная длина сварных швов и количество их перекрестий, которые затем применяются для определения объема их контроля. В некоторых случаях длина сварных швов и количество их перекрестий может заноситься оператором.

ЭЛЕМЕНТЫ СОСУДА					Листы, мм	
ОБЕЧАЙКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ					Ширина	Длина
					1500	6000
Таблица 1.1						
№ по схеме	Элемент сосуда	Внутренний диаметр, мм	Длина, мм	Толщина, мм	Марка стали	Р внутри
1	обечайка корпуса	2600	10012	8	ВСт3	0,04
Таблица 1.2						
№ по схеме	Элемент сосуда	Длина частей, мм		Толщина, мм	Марка стали	Р внутри
		цилиндрической	выпуклой			
2	днище корпуса левое	60	650	16	ВСт3	0,04
3	днище корпуса правое	60	650	16	ВСт3	0,04

Рисунок 3 - Фрагмент карты исходных данных сосуда



■ Места контроля сварных швов

▣ Места контроля твердости

сосуда с элементами и сечениями, в которых проводится дефектоскопический контроль

На рисунке 4 схематически показан горизонтальный сосуд и его сечения, обозначаются места в которых проводится дефектоскопический контроль, замеры толщин и твердости [13, 14].

Формы оформляемых в виде электронных таблиц, документов приняты согласно [13], в том числе заключения по визуально-измерительному контролю [15] и измерению толщин [16], ультразвуковому [17], магнитопорошковому [18], радиографическому [19], капиллярному [20] и другими методами контроля металла и сварных швов, например, течеисканием, акустико-эмиссионным контролем, измерением коэффициентов концентрации напряжений и т.д. Для соответствующих марок сталей и температуры эксплуатации определяются их механические характеристики [1] и автоматически заносятся в расчетные модули и в экспертное заключение.

Комплекс РПИ применим для расчета до 20 обечаяк (поясов резервуаров), днищ корпусов и до 30 штуцерных узлов. Вероятность ошибок ввода информации снижается автоматическим переносом ее во все последующие модули.

Как показано на рисунках (5÷6), все расчетные модули разбиты на страницы. На каждой странице вначале расположены расчетные формулы и показан порядок расчета, а затем таблицы, со входными данными и результатами расчета прочности по элементам сосуда. Соответствующими модулями проводятся прочностные расчеты с определением запасов прочности по каждому элементу. Аналогично в зависимости от пространственного положения сосуда проводится расчет по циклическим и малоцикловым нагрузкам, напряженному состоянию зон врезки штуцеров и по опорным нагрузкам [2].

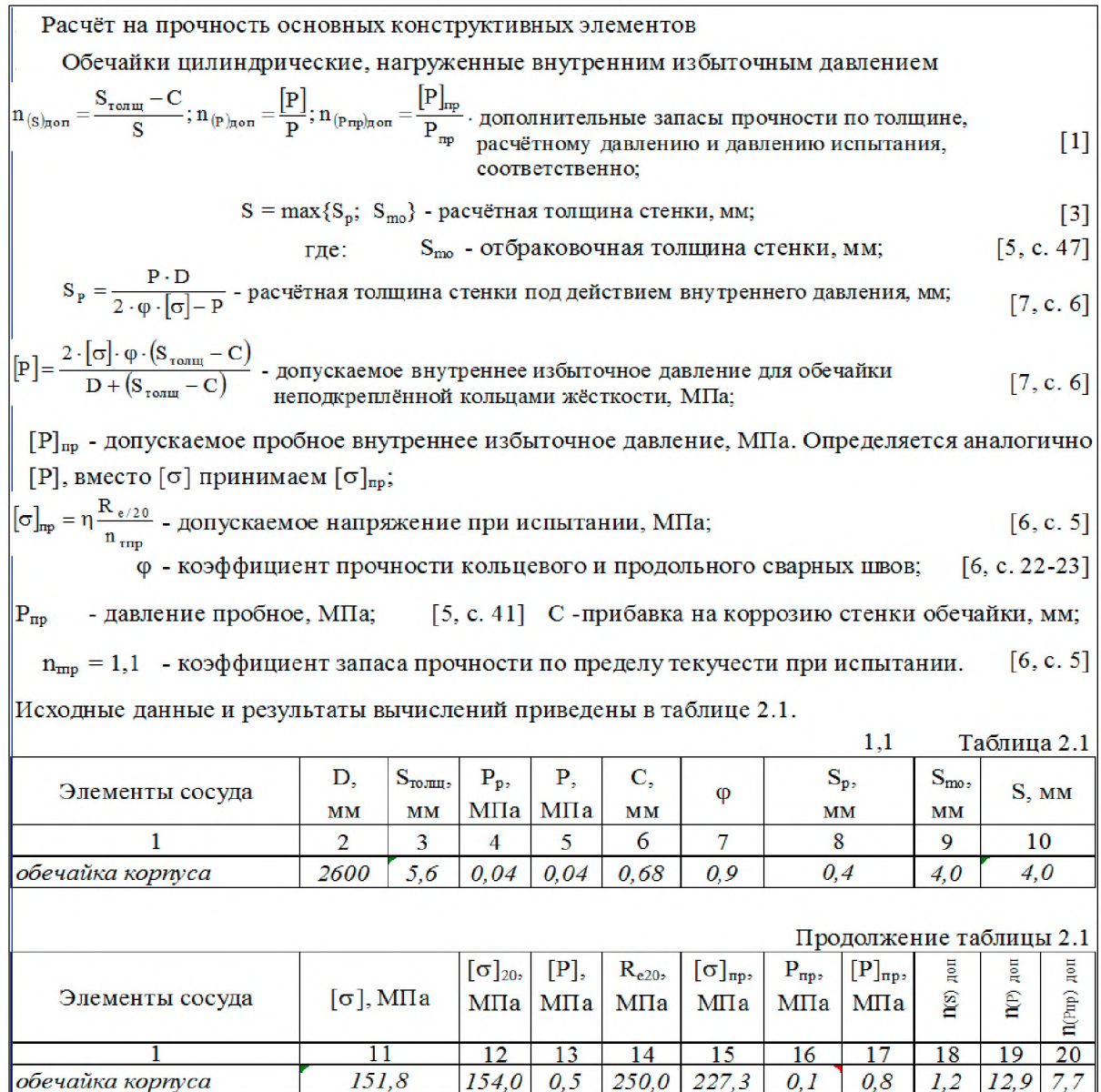


Рисунок 5 - Модуль расчета прочности элементов корпуса сосуда Рисунок 4 - Схема корпуса

В том случае, когда запасы прочности элементов оказались ниже нормативных вследствие изнашивания, подключением дополнительного модуля выполняется расчет прочности для определения толщин вновь устанавливаемых или усиливаемых элементов.

Расчетные модули комплекса подключаются в заданной последовательности их применения. Результаты расчета элементов оценивают по их запасам прочности [11, 22], которые должны быть выше нормативных запасов. В модулях расчета вначале приведены расчетные формулы и порядок расчета, а в таблицы автоматически заносятся исходные данные и результаты автоматизиро-

ванного расчета прочности по основным элементам ТУ.

На рисунке 5 показан модуль расчета прочности основных элементов корпуса (обечайки) горизонтального сосуда. Последующими модулями согласно нормативу [1] проводится расчет патрубков и зон врезки штуцеров по укреплениям отверстий в обечайках и днищах корпуса, определяется напряженное состояние в этих зонах от воздействия внешних нагрузок на штуцера по циклическим и малоцикловым нагрузкам. Проводится расчет прочности и устойчивости по опорным нагрузкам на корпус [2] в зависимости от пространственного положения сосуда. По нормам [21] проводится расчет на сопротив-

ление хрупкому разрушению. Модуль расчета объемов контроля и показателя эффективности ТД связан с таблицами протоколов проведенного дефектоскопического контроля, там же учитывается проконтролированная длина сварных швов и количество их пере-

крестий в зависимости от размеров сосуда. В соответствующем модуле выводится результат расчета объемов, по которому определяется показатель эффективности ТД в зависимости от коэффициента ответственности сосуда.

Ресурс основных элементов сосуда												
Полный ресурс		$T_n = T_э \cdot \sqrt{\left(\frac{n_k}{n_n - n_k}\right)^\xi}$										
Текущий ресурс		$T_k = T_э \cdot \sqrt{W_{эфф} \cdot \beta \cdot \left(\frac{n_k}{n_n - n_k}\right)^\xi}$										
Исходные данные и результаты расчёта приведены в таблице .												Таблица
$S_n$	$S_{min}$	$S_k$	$W_{эфф}$	$n_n$	$n_k^\phi$	$T_э$ , лет	$T_{П}$ , лет	$T_k$ , лет	$q$	$\xi$	$\beta$	Коэффициент безопасности
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
8,0	2,5	5,6	0,89	3,2	1,8	20,0	22,4	17,7	0,8	0,94	0,7	1,25
16,0	2,5	13,4	0,89	6,4	4,3	20,0	27,9	22,0	0,8	0,94	0,7	1,95
16,0	2,5	13,1	0,89	6,4	4,2	20,0	27,0	22,0	0,8	0,94	0,7	1,83
Ресурс штуцеров сосуда												
Исходные данные и результаты расчёта приведены в таблице 7.2.												Таблица
$S_n$	$S_{min}$	$S_k$	$W_{эфф}$	$n_n$	$n_k^\phi$	$T_э$ , лет	$T_{П}$ , лет	$T_k$ , лет	$q$	$\xi$	$\beta$	Коэффициент безопасности
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
8,0	3,000	6,3	0,89	2,7	1,7	20,0	25,7	20,3	0,8	0,94	0,7	1,65
10,0	3,000	5,9	0,89	3,3	1,6	20,0	19,0	15,0	0,8	0,94	0,7	0,90
8,0	2,500	6,0	0,89	3,2	1,9	20,0	24,2	19,1	0,8	0,94	0,7	1,46
5,0	2,000	4,3	0,89	2,5	1,7	20,0	29,0	22,9	0,8	0,94	0,7	2,11
6,0	2,500	5,1	0,89	2,4	1,6	20,0	28,5	22,5	0,8	0,94	0,7	2,03

Рисунок 6 - Результаты расчета ресурса обечаек корпуса и штуцеров сосуда

На рисунке 6 показан модуль расчета ресурса по всем элементам сосуда с учетом эффективного объема ТД  $W_{эфф}$  [22], исходных запасов прочности  $n_n$ , фактических запасов прочности на момент ТД  $n_k^\phi$  коэффициента дефектности  $\beta$  [23], показателя коррозии и коррозионной стойкости  $q$  [24] и коэффициента ответственности сосуда  $\xi$  [22]. В итоге по каждому элементу сосуда определяется расчетный ресурс  $T_k$  и коэффициент безопасности [24] на момент его окончания.

Последним модулем, куда приходят все необходимые сведения для эксперта, является проект экспертного заключения, в который при необходимости могут вноситься

дополнительные данные, корректировки, описания процедур ремонта и другие сведения, например, приказы, предписания Ростехнадзора и т.п. По результатам РПИ назначается срок безопасной эксплуатации ТУ. В итоге формируется единый пакет документов, разработанный в соответствии с требованиями по ЭПБ технических устройств опасных производств [5, 6]. Экспертное заключение, зарегистрированное Ростехнадзором, хранится в электронном и распечатанном виде в управлении технического надзора предприятия.

Выводы:

1. Автоматизированный комплекс РПИ направлен на снижение трудоемкости

подготовки рекомендаций на ремонт и экспертизы промышленной безопасности ТУ технологических установок.

2. Затраты времени на обработку результатов ТД, проведение РПИ, на разработку экспертного заключения и рекомендаций по усилению изношенных элементов цилиндрического резервуара объемом 500 м<sup>3</sup> с

применением комплекса были снижены до трех рабочих дней.

3. Комплекс РПИ, примененный в подразделениях ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» при техническом диагностировании 3677 сосудов, аппаратов и резервуаров, позволил получить годовой экономический эффект 2,6 млн рублей (в ценах 2003 года).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 34233.1÷11-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сборник стандартов. – М.: Стандартинформ, 2018.

2. ГОСТ 34283-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность при ветровых, сейсмических и других внешних нагрузках. – М.: Стандартинформ, 2018.

3. ГОСТ 34233.12-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Требования к форме представления расчетов на прочность, выполняемых на ЭВМ (с Поправкой).

4. ПАССАТ (Прочностной Анализ Состояния Сосудов, Аппаратов, Теплообменников) / Вендор: НТП «Трубопровод». Область применения: Инженерные расчеты, Монтажно-технологические решения. URL: <https://www.caduser.ru/cataog/soft/passat.html> (Дата обращения 18.11.2020 г.)

5. Программа расчета на прочность PVP-Design. URL: <https://amarant1.com/ru/software/pvp-design> (Дата обращения 18.11.2020 г.).

6. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности». Утв. Приказом Ростехнадзора от 14.11.2013 № 538 (Зарегистрировано в Минюсте России 26.12.2013 № 30855) (с изменениями на 9 марта 2016 года).

7. 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).

8. Колмаков В.П., Черепанов А.П., Порошин Ю.В., Вуйчик В.З. Комплекс компьютерной обработки результатов техниче-

ского диагностирования // Безопасность труда в промышленности. - 2010. – № 7. – С. 59–63.

9. Черепанов А.П. Технология прогнозирования ресурса технических устройств на основе ресурсно–прочностных исследований // Журнал «Вестник ИрГТУ», №6. 2011. – С. 16–21.

10. 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.

11. 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.

12. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А. Ю. Автоматизация прогнозирования ТС и остаточного ресурса деталей уникальных машин и аппаратуры // Заводская лаборатория. Диагностика материалов». - 2009. - № 3. Том 75. – С 48–57.

13. Методика технического диагностирования технического состояния и определения остаточного ресурса технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств (ДиОР–05). Волгоград, ОАО "ВНИК-ТНефтехимоборудование", 2006. – 81 с.

14. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов. РД 03-421-01.

15. РД 03-606-03 Инструкция по визуальному и измерительному контролю /М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России». 2004.

16. ГОСТ Р ИСО 16809-2015 Кон-

троль неразрушающий. Контроль ультразвуковой. Измерение толщины.

17. ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.

18. ГОСТ Р 56512-2015 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы.

19. ГОСТ 7512-82 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод (с Изменением N 1).

20. ГОСТ 18442-80 Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования (с Изменениями N 1, 2).

21. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. (ПНАЭ Г-7-002-

86)/Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

22. Черепанов А.П., Порошин Ю.В. Оценка эффективности диагностирования сосудов, резервуаров и трубопроводов // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 10. С. 43–46.

23. 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.

Черепанов А.П., Ляпустин П.К. Закономерности снижения ресурса уникальных машин. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 3 (63). С. 37–45.