

УДК 621.643
Научная специальность: 5.2.6

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2024

Расчет инспекционного интервала трубного пучка теплообменника с применением риск-ориентированного подхода по методологии API 581

Боровикова С.А.*,
Липатов Р.А.,
Александрович С.И.,
Бриков А.В.,
Арктик СПГ 2,
629309, Россия,
г. Новый Уренгой,
мкр. Славянский, д. 9, ком. 117

Аннотация

В статье приведен пример использования методологии, описанной в стандарте API 581 3rd Edition, для расчета инспекционного интервала трубного пучка теплообменника. Детально описаны: ход расчета; концепция определения вероятности последствий, а также риска отказа. Показано, что методика API 581 3rd Edition является эффективным инструментом, позволяющим обеспечить допустимые значения уровня риска. Приведено сравнение интервалов инспекции при наличии и отсутствии инспекционных данных при максимальной допустимой вероятности отказа.

Ключевые слова: инспекция с учетом факторов риска; риск-ориентированный подход к инспекции; теплообменник; отказ; API 581.

Для цитирования: Боровикова С.А., Липатов Р.А., Александрович С.И., Бриков А.В. Расчет инспекционного интервала трубного пучка теплообменника с применением риск-ориентированного подхода по методологии API 581 // Проблемы анализа риска. 2024. Т. 21. № 6. С. 89–99.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Calculation of Inspection Interval of Heat Exchanger Tube Bundle Using Risk-Based Approach According to API 581 Methodology

Sofya A. Borovikova *,
Roman A. Lipatov,
Sergey I. Alexandrovich,
Alexander V. Brikov,
ARCTIC LNG 2,
Slavyansky Microdistrict, 9,
off. 117, Novy Urengoy, 629309,
Russia,

Abstract

This article provides an example of using the methodology described in API 581 3rd Edition to calculate the inspection interval of a heat exchanger tube bundle. The calculation process, the concept of determining the probability, consequences, and risk of failure are described in detail. API 581 3rd Edition has been shown to be an effective tool for achieving acceptable risk levels. A comparison of inspection intervals in the presence and absence of inspection data at the maximum permissible probability of failure is given.

Keywords: risk-based inspection; risk-based approach to inspection; heat exchanger; failure; API 581.

For citation: Borovikova S.A., Lipatov R.A., Alexandrovich S.I., Brikov A.V. // Issues of Risk Analysis. 2024;21(6):89-99. (In Russ.).

The authors declares no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Объект исследования
2. Методология исследования
3. Обсуждение результатов

Заключение

Список источников

Введение

Регламентные сроки проведения технического освидетельствования кожухотрубных теплообменников в Российской Федерации устанавливаются предприятием-изготовителем оборудования и должны соответствовать отраслевым требованиям, указанным в [1]. При отсутствии требований к периодичности освидетельствования в руководстве по эксплуатации она назначается с учетом фактической или ожидаемой скорости коррозии. Трубные пучки кожухотрубных теплообменников относятся к оборудованию закрытой системы добычи, переработки и подготовки углеводородов и не подлежат учету в органах Ростехнадзора¹. В соответствии с этим устанавливаются следующие сроки освидетельствования:

- инспекции с периодичностью 12 месяцев подлежат сосуды, работающие со средой, вызывающей коррозионные разрушения со скоростью $> 0,1$ мм/год;
- инспекции с периодичностью два года подлежат сосуды, работающие со средой, вызывающей коррозионные разрушения со скоростью $< 0,1$ мм/год;
- гидравлические испытания должны проводиться не реже, чем один раз в восемь лет.

Зарубежный подход к инспекции теплообменников отличается от российского подхода. В соответствии с API 510² кожухотрубные теплообменники относятся к оборудованию, работающему под давлением, на которое распространяются те же требования, что и к сосудам под давлением (рекомендации по проведению инспекции различных типов теплообменников приведены в API 572³). Таким образом, по умолчанию инспекционные интервалы должны устанавливаться на основе требований изготовителя, но не реже:

- одного раза в пять лет — для наружного осмотра⁴;
- половины оставшегося срока службы или десять лет (в зависимости от того, что меньше) — для внутренней инспекции⁵.

Основным отличием зарубежных принципов обеспечения промышленной безопасности является

¹ Приказ Ростехнадзора от 15.12.2020 № 536 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением».

² API 510, Pressure Vessel Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair and Alteration, 11th edition 2014.

³ API 572 Inspection Practices for Pressure Vessels, 5th edition 2023.

⁴ API 510, Pressure Vessel Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair and Alteration, 11th edition 2014.

⁵ Там же.

определение периодичности инспекции на основе методик риск-ориентированного подхода (инспекция с учетом факторов риска — ИУФР), т.е. исходя из совокупной оценки вероятности отказа и его последствий. Существует ряд методических рекомендаций по применению ИУФР⁶.

Отказ по трубному пучку теплообменника обычно не приводит к последствиям для промышленной безопасности (выбросу токсических веществ, возгоранию и т.д.). Риск отказа определяется экономическими последствиями, вызванными простоем технологического оборудования и необходимостью его ремонта или замены. Во многом исходя из этого, в 2008 г. Стандарт⁷ был дополнен методикой расчета межинспекционного интервала трубных пучков.

Имеется достаточное количество зарубежных работ, посвященных применению ИУФР к разработке графика инспекции трубных пучков [1, 2]. В Российской Федерации методы ИУФР в настоящий момент менее распространены, что связано с отсутствием нормативно-технического обеспечения этого процесса. Отечественные примеры применения ИУФР представлены в работах [3–9].

В статье приведен расчет инспекционного интервала трубного пучка теплообменника на основании методики риск-ориентированного подхода к инспекции по API 581⁸. Реализация методики расчета, предложенной в статье, включает в себя четыре основных шага: определение вероятности отказа; расчет последствий отказа; анализ риска; расчет инспекционного интервала.

1. Объект исследования

Объект исследования — горизонтальный кожухотрубный теплообменник, использующийся для охлаждения газа. Изготовлен в соответствии со стандартом «ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)».

Размеры теплообменника составляют 965x3048 мм, максимальная рабочая температура и давление 177 °C и 9410 кПа изб. (корпус), 71 °C и 517 кПа изб. (трубная секция). Максимально допустимая скорость потока в трубной секции — 1,43 м/сек. Минимальная

⁶ API 580 Risk-based Inspection, 3th edition 2016; API 581 Risk-Based Inspection Methodology 3th edition 2016; ASME PCC-3 — 2023, Inspection Planning Using Risk-based Methods.

⁷ API 580 Risk-based Inspection, 3th edition 016.

⁸ API 581 Risk-Based Inspection Methodology 3th edition 2016.

температура эксплуатации –35 °С. Корпус изготовлен из углеродистой стали марки ASTM SA516–70N, имеет допуск на коррозию 3 мм. Трубная секция состоит из 564 U-образных трубок внешним диаметром 19 мм с толщиной стенки 3,4 мм, изготовленных из медно-никелевого сплава марки SB111-C70600. В качестве охлаждающей среды используется вода.

2. Методология исследования

Одним из подходов для определения инспекционных интервалов в нефтяной и нефтехимической промышленности является методология, которая определяет риск отказа пучка теплообменника как комбинацию вероятности отказа (Probability of Failure — *PoF*) в установленный период и его последствий (Consequence of Failure — *CoF*)⁹. Математически данный параметр выражается формулой:

$$Risk_f^{tube} = P_f^{tube} \times C_f^{tube}, \quad (1)$$

где:

$Risk_f^{tube}$ — риск отказа пучка теплообменника;
 P_f^{tube} — вероятность отказа пучка теплообменника;
 C_f^{tube} — последствия отказа пучка теплообменника.

Расчет P_f^{tube} проводится с учетом вероятного механизма деградации, а также проектных параметров и эксплуатационных условий. P_f^{tube} для пучка теплообменника с использованием двухпараметрического распределения Вейбулла рассчитывается по формуле:

$$P_f^{tube} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right], \quad (2)$$

где:

β — параметр формы распределения Вейбулла;
 η — параметр масштаба распределения Вейбулла, лет;
 t — время в годах.

Стандарт¹⁰ предусматривает четыре метода расчета вероятности отказа, выбор которых зависит от имеющихся исходных данных.

Метод 1. Оценка вероятности отказа осуществляется на основании статистических данных по отказам

⁹ API 580 Risk-based Inspection, 3th edition 2016; API 581 Risk-Based Inspection Methodology 3th edition 2016; ASME PCC-3 — 2023, Inspection Planning Using Risk-based Methods.

¹⁰ API 581 Risk-Based Inspection Methodology 3th edition 2016.

аналогичного оборудования, представленных в собственных или отраслевых базах, например, OREDA [10], с последующим построением распределения Вейбулла и выполнением анализа Вейбулла-Байеса. Преимущество этого метода заключается в возможности принятия обоснованных решений при значительно меньшем количестве данных об отказах, в отличие от других статистических распределений. В табл. 8.1¹¹ приведены требования к данным, используемым в качестве критериев соответствия (аналогичное строение, температура, давление, технологическая среда, механизм деградации) при составлении собственной базы данных отказов.

Метод 2. Применяется, когда у пользователя имеются собственные параметры распределения Вейбулла η и β . Для определения вероятности отказа пучка как функции времени используется формула (2).

Метод 3. Используется при наличии значений средней наработки на отказ. Если параметр β известен (в стандарте API 581 допускается по умолчанию принять этот параметр равным трем), параметр η может быть рассчитан с помощью гамма-функции по формуле:

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma\left[1 + \frac{1}{\beta}\right], \quad (3)$$

где:

$MTTF$ — средняя наработка до отказа;
 Γ — гамма-функция.

Метод 4. При наличии результатов, по меньшей мере двух сроков службы пучка, можно выполнить анализ Вейбулла-Байеса. При этом параметр β рассчитывается по методу 1, а параметр η по формуле:

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^N \frac{t_{dur,i}^\beta}{r}\right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (4)$$

где:

$t_{dur,i}^\beta$ — время жизни для i -го пучка, лет;
 N — объем выборки.

3. Обсуждение результатов

В рассматриваемом случае наиболее подходящим для расчета является метод 1 ввиду отсутствия параметров η , β или $MTTF$. В качестве исходной информации

¹¹ API 581 Risk-Based Inspection Methodology 3th edition 2016.

для проведения расчета использовали данные об отказах пучков описанного и аналогичных ему теплообменников. Технологические параметры, материалы и механизм деградации на протяжении эксплуатации не изменялись. Нарботка пучков теплообменников представлена в табл. 1.

Таблица 1. Нарботка на отказ пучков теплообменников

Table 1. Time between failures of heat exchanger bundles

Идентификационный номер	Нарботка (t), лет	Факт отказа зафиксирован
T1	7,50	Да
T2	8,75	Да
T3	5,00	Да
T4	3,50	Да
T5	5,63	Да
T6	4,30	Да
T7	6,88	Да
T8	4,58	Нет

Для определения параметров η и β распределения Вейбулла использовали графический метод. При небольшом объеме выборки график строили в координатах $X(\ln(t))$ от $Y(\ln(1/\ln(1 - F(i))))$. Пример использования электронных таблиц для расчета η и β графическим методом приведен в приложении Е¹². Алгоритм построения графика с использованием электронных таблиц выглядит следующим образом:

1) данные об отказах располагают в порядке возрастания;

2) рассчитывают медиану ранга $F_i(t)$ с использованием приближения Бернарда:

$$F(i) = \frac{(i-0,3)}{(n+0,4)}, \quad (5)$$

где:

$F(i)$ — медиана ранга;

i — скорректированный ранг.

Факт отказа фиксировался при каждой замене трубного пучка теплообменника, кроме Т8 (см. табл. 1), когда была проведена замена на пучок из другого материала. При наличии в выборке наработок до отказа

¹² ГОСТ Р 50779.27-2017. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146523>.

«приостановленных» (цензурированных) объектов их включают в анализ и производят расчет скорректированного ранга для отказавших единиц оборудования (приложение Е.2¹³) по формуле:

$$i = \frac{i_{reverse} \cdot i_{n-1} + (N+1)}{i_{reverse} + 1}, \quad (6)$$

где:

$i_{reverse}$ — исходный ранг (ранги располагаются в порядке убывания);

i_{n-1} — предыдущий скорректированный ранг;

N — общее количество отказавших и приостановленных объектов (объем выборки).

3) рассчитывают $X_i = \ln(t_i)$ и $Y_i = (\ln(1/\ln(1 - F(i))))$;

4) строят график X от Y (тип графика — точечная диаграмма), добавляют прямую линейной регрессии, уравнение прямой в виде $y = kx + b$ и коэффициент детерминации R^2 ;

5) проводят проверку соответствия распределению Вейбулла на основе значения коэффициента детерминации R^2 ;

6) расчет параметров β и η производят по формулам (7) и (8):

$$\beta = \frac{1}{k}, \quad (7)$$

где k — угловой коэффициент прямой линии регрессии:

$$\eta = e^b, \quad (8)$$

где b — коэффициент сдвига прямой линии регрессии вдоль оси Y .

Результаты анализа данных для трубного пучка объекта исследования графическим методом представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Оценка коэффициента $R^2 = 0,98$ подтверждает соответствие выборки распределению Вейбулла. Рассчитаем параметры распределения по формулам (7) и (8),

$$\beta = 1/0,287 = 3,486;$$

$$\eta = \exp(1,905) = 6,718.$$

Таким образом, вероятность отказа пучка теплообменника ЕХ-0203 выражается двухпараметрической функцией распределения Вейбулла:

¹³ ГОСТ Р 50779.27-2017. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146523>.

Таблица 2. Результаты анализа данных для трубного пучка теплообменника

Table 2. Data analysis results for heat exchanger bundle

Исходный ранг, $i_{reverse}$	Скорректированный ранг, i	Наработка t_i , лет	Медиана ранга $F(i)$	$X_i = (\ln(1/\ln(1 - F(i))))$	$Y_i = \ln(t_i)$
8	1,00	3,50	0,08	1,25	-2,44
7	2,00	4,30	0,20	1,46	-1,49
6	(приостановленный)	4,58			
5	3,17	5,00	0,34	1,61	-0,87
4	4,33	5,63	0,48	1,73	-0,42
3	5,50	6,88	0,62	1,93	-0,04
2	6,67	7,50	0,76	2,01	0,35
1	7,83	8,75	0,90	2,17	0,82

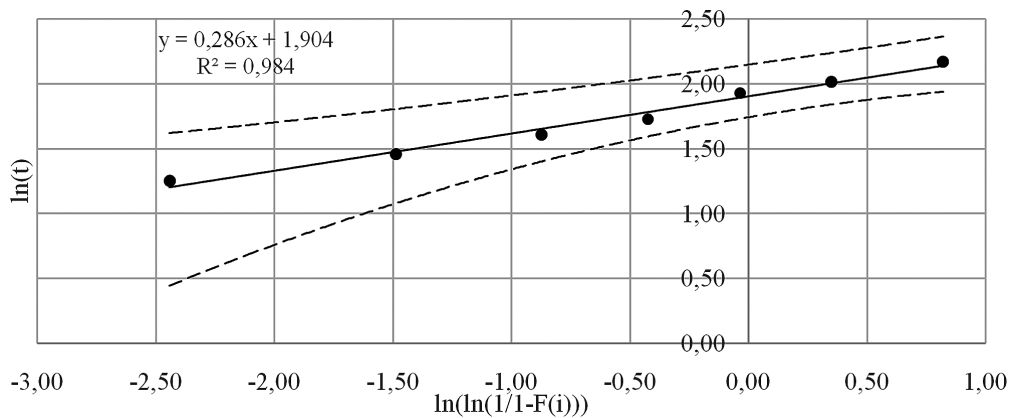


Рис. 1. Представление данных для графического анализа

Figure 1. Presenting data for graphical analysis

$$P_f^{tube} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{6,718} \right)^{3,486} \right]. \quad (9)$$

График зависимости вероятности отказа пучка теплообменника от времени эксплуатации представлен на рис. 2.

Экономические последствия зависят от отказа трубного пучка и включают затраты, связанные с упущенной прибылью из-за простоя производства, отрицательным воздействием на окружающую среду, техническим обслуживанием и заменой пучка. При отказе пучка теплообменника такие последствия, как воздействие на человека и возгорание, не рассматриваются. Последствия отказа пучка определяют по формуле:

$$C_f^{tube} = Cost_{prod} + Cost_{env} + Cost_{bundle} + Cost_{maint}, \quad (10)$$

где:

C_f^{tube} — экономические последствия отказа, руб.;

$Cost_{prod}$ — затраты, связанные с упущенной прибылью из-за простоя производства, руб.;

$Cost_{env}$ — затраты, связанные с отрицательным воздействием на окружающую среду, руб.;

$Cost_{bundle}$ — стоимость замены трубного пучка, руб.;

$Cost_{maint}$ — затраты, связанные с техническим обслуживанием пучка и подготовкой к последующей инспекции или замене, руб.

Затраты, связанные с упущенной прибылью из-за простоя производства, определяют по формуле:

$$Cost_{prod} = Unit_{prod} \cdot \left(\frac{Rate_{red}}{100} \right) \cdot D_{sd}, \quad (11)$$

где:

$Unit_{prod}$ — ежедневная прибыль, получаемая от эксплуатации установки, руб.;

$Rate_{red}$ — снижение производства в результате вывода оборудования из эксплуатации, %;



Рис. 2. Зависимость вероятности отказа пучка теплообменника от времени эксплуатации

Figure 2. Dependence of probability of heat exchanger bundle failure on operation time

D_{sd} — время, необходимое для незапланированного ремонта оборудования, день.

Параметр $Unit_{prod}$ является произведением суточной производительности установки в баррелях/день на стоимость одного барреля нефти. В результате вывода охладителя газа из эксплуатации ожидается снижение производства ($Rate_{red}$) на 10% (т.к. основным продуктом установки является нефть). По оценке ремонт будет проведен (D_{sd}) в течение трех дней.

Затраты, связанные с заменой пучка, были рассчитаны по формуле:

$$Cost_{bundle} = \frac{1,98 \cdot \left(\frac{\pi D_{shell}^2}{4} \right) \cdot L_{tube} \cdot M_f}{V_{bundle}}, \quad (12)$$

где:

D_{shell} — внутренний диаметр кожуха теплообменника, равный 0,965 м;

L_{tube} — длина трубки теплообменного пучка, равная 3,048 м;

M_f — коэффициент стоимости материала (табл. 8.3¹⁴), равный 3,5;

V_{bundle} — объем типового пучка из углеродистой стали $d=800$ мм $l=6$ м, равный 3,016 м³;

1,98 — коэффициент, учитывающий стоимость замены типового пучка из углеродистой стали, млн руб.

В соответствии со стандартом API 581 затраты на замену типового пучка из углеродистой стали составляют 22 тыс. долл. США или ~ 1,98 млн руб.

Затраты, связанные с отрицательным воздействием на окружающую среду ($Cost_{env}$), для рассматриваемого случая, где охлаждающей средой является вода, а охлаждаемой — природный газ, отсутствуют. Затраты на техобслуживание, связанное с инспекцией и заменой пучка ($Cost_{maint}$), по оценке составляют ~ 2,25 млн руб.

В этом случае последствия отказа пучка составят:

$$C_f^{tube} = 144 \cdot \left(\frac{10}{100} \right) \cdot 3 + 0 + 1,98 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,965^2}{4} \right) \cdot 3,048 \cdot 3,5 + \frac{3,016}{3,016} + 2,25. \\ C_f^{tube} = 50,6 \text{ млн руб.}$$

Максимально допустимую вероятность отказа пучка в зависимости от последствий отказа и максимально допустимого уровня риска можно выразить из формулы (1), получив:

$$P_{f,max}^{tube} = \frac{Risk_{igt}}{C_f^{tube}}, \quad (13)$$

где:

$P_{f,max}^{tube}$ — максимально допустимая вероятность отказа пучка;

$Risk_{igt}$ — максимально допустимый уровень риска, руб.

Максимально допустимый уровень риска $Risk_{igt}$ определяется пользователем при принятии решений и составляет в рассматриваемом случае 9 млн руб. Так, приемлемым уровнем риска для Общества является

¹⁴ API 581 Risk-Based Inspection Methodology 3th edition 2016.

ТЯЖЕСТЬ	ПОСЛЕДСТВИЯ		ВЕРОЯТНОСТЬ ПОСЛЕДСТВИЙ				
	Имущество	Критерий	А	В	С	Д	Е
			Никогда не имело место в отрасли	Имело место в отрасли	Имело место в Обществе или более одного раза в год в отрасли	Случалось на объекте или более одного раза в год в Обществе	Имело место несколько раз в год на объекте
0	Без ущерба	Отсутствие экономических последствий					
1	Незначительный ущерб	Экономические последствия не превышают 9 млн руб.					
2	Небольшой ущерб	Экономические последствия от 9 млн руб. до 90 млн руб.					
3	Умеренный ущерб	Экономические последствия от 90 млн руб. до 900 млн руб.					
4	Значительный ущерб	Экономические последствия от 900 млн руб. до 9 млрд руб.					
5	Крупный ущерб	Экономические последствия превышают 9 млрд руб.					

Рис. 3. Матрица оценки рисков предприятия

Figure 3. Enterprise risk assessment matrix

событие, находящееся в «синей зоне» матрицы оценки риска (участка А4–Е1) (рис. 3). Мы знаем, что отказы этого оборудования на предприятии происходили (категория вероятности D). При такой категории вероятности для удержания риска на приемлемом уровне категория последствий не должна превышать единицы (или 100 тыс. долл. США ~ 9 млн руб.).

Таким образом, максимально допустимая вероятность отказа для описываемого примера составит:

$$P_{f,max}^{tube} = \frac{9,0}{50,6} = 0,18.$$

Рекомендованный инспекционный интервал при максимально допустимой вероятности отказа 0,18 определяется по формуле:

$$t = \eta \cdot \left(-\ln [1 - P_{f,max}^{tube}] \right)^{\frac{1}{\beta}};$$

$$t = 6,718 \cdot \left(-\ln [1 - 0,18] \right)^{\frac{1}{3,486}};$$

$$t = 4,21 \text{ лет.} \tag{14}$$

Методология API 581¹⁵ позволяет проводить переоценку интервала инспекции при появлении дополнительной информации, полученной в ходе инспекции. Скорость коррозии трубного пучка определяется по формуле:

$$t_{rate} = \frac{\bar{t}_{orig} - \bar{t}_{insp}}{t_{dur}}, \tag{15}$$

где:

- t_{rate} — скорость коррозии, мм/год;
- \bar{t}_{orig} — номинальная толщина стенки, мм;
- \bar{t}_{insp} — толщина стенки, измеренная во время инспектирования, мм;
- t_{dur} — срок службы с момента ввода в эксплуатацию до момента инспектирования, лет.

По данным инспекции пучка теплообменника скорость коррозии составила 0,5 мм/год. Прогнозируемый

¹⁵ API 581 Risk-Based Inspection Methodology 3th edition 2016.

на основе инспекционных данных срок службы рассчитан по формуле:

$$PBL_{adj} = \frac{RWT_f \cdot \bar{t}_{orig}}{t_{rate}}, \quad (16)$$

где:

PBL_{adj} — прогнозируемый срок службы пучка теплообменника с использованием данных инспекции, лет;

RWT_f — коэффициент для учета неопределенности при расчете скорости коррозии.

В рассматриваемом случае из-за большого объема проинспектированных трубок (высокая достоверность оценки скорости коррозии) коэффициент RWT_f принят равным 0,9. Прогнозируемый срок службы пучка теплообменника PBL_{adj} составит:

$$PBL_{adj} = \frac{0,9 \cdot 3,4}{0,5},$$

$$PBL_{adj} = 6,12 \text{ года.}$$

Следующим шагом является определение модифицированного параметра η_{mod} по формуле:

$$\eta_{mod} = \left(\frac{1}{r} \cdot \sum_{i=1}^N t_i^\beta \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (17)$$

где:

η_{mod} — модифицированный параметр масштаба распределения Вейбулла, лет;

r — количество отказавших пучков за срок службы теплообменника;

t_i^β — время жизни для i -го пучка, лет.

Модификация параметра η осуществляется при добавлении прогнозируемого срока службы пучка, рассчитанного по формуле (16), в исходную выборку отказов (табл. 1). Параметр β остается таким же, как и для исходной кривой Вейбулла. В основе анализа Вейбулла-Байеса лежит предположение о том, что одинаковый механизм отказа приводит к одинаковому значению параметра формы. Получим следующее выражение:

$$\eta_{mod} = \left(\frac{1}{8} \cdot ((3,50)^{3,486} + (4,30)^{3,486} + (4,58)^{3,486} + (5,00)^{3,486} + (5,63)^{3,486} + (6,88)^{3,486} + (7,50)^{3,486} + (8,75)^{3,486} + (6,12)^{3,486}) \right)^{\frac{1}{3,486}};$$

$$\eta_{mod} = 6,533 \text{ лет.}$$

По формуле (14) рассчитаем новый инспекционный интервал с учетом изменения параметра η :

$$t = 6,533 \cdot (-\ln[1 - 0,18])^{\frac{1}{3,486}};$$

$$t = 4,09 \text{ лет.}$$

Таким образом, с учетом инспекционных данных рекомендуемый инспекционный интервал при максимальной приемлемой вероятности отказа 18% для пучка уменьшился с 4,21 лет до 4,09 лет. В случае применения подхода в соответствии с приказом Ростехнадзора¹⁶ интервал инспекции при скорости коррозии >0,1 мм/год должен составлять 12 месяцев, что в четыре раза чаще, чем по методике, приведенной в этой статье.

Заключение

Риск-ориентированный подход в мировой практике является широко применяемым и хорошо зарекомендовавшим себя инструментом обеспечения целостности оборудования. В статье представлен пример расчета интервала инспекции для трубного пучка охладителя компрессора по методике, представленной в стандарте API 581¹⁷, в основу которого положен вероятностный подход к определению риска отказа. В результате расчета и с учетом графика технического обслуживания предприятия интервал инспекции составил четыре года. Для сравнения, при регламентированном подходе, который предлагается в приказе Ростехнадзора¹⁸, внутренний осмотр должен быть проведен через один год с начала эксплуатации.

С развитием методов организации производства должны совершенствоваться и методы обеспечения его безопасности. В настоящее время в Российской Федерации применение риск-ориентированного подхода к инспекции производственных объектов затрудняется из-за несовершенства нормативно-правовой базы. Решение этой проблемы позволит повысить эффективность производства, сократив время простоя оборудования на проведение инспекций без ущерба для его безопасности.

¹⁶ Приказ Ростехнадзора от 15.12.2020 № 536 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением».

¹⁷ API 581 Risk-Based Inspection Methodology 3th edition 2016.

¹⁸ Приказ Ростехнадзора от 15.12.2020 № 536 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением».

Список источников [References]

1. Prayoga Dharma Gita Surya, Dwi Priyanta and Nurhadi Siswanto. Comparative Analysis of Probability of Failure Determination Using Weibull Distribution and Generic Failure Frequencies on Heat Exchanger Tube Bundles Based on API 581 // *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*. 2018;2(3):210–215
<https://doi.org/10.12962/j25481479.v2i3.3576>
2. Elwerfalli, A.; Alsadaie, S.; Mujtaba, I. M. Estimation of Shutdown Schedule to Remove Fouling Layers of Heat Exchangers Using Risk-Based Inspection (RBI). *Processes* 2021, 9, 2177 <https://doi.org/10.3390/pr9122177>
3. Бриков А. В., Александрович С. И. Риск-ориентированный подход к инспектированию оборудования. Современные проблемы и решения. // *Нефтепромысловое дело*. 2023. № 1(649). С. 35–40.
[https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-1\(649\)-35-40](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-1(649)-35-40) [Brikov A. V., Alexandrovich S. I. Risk based inspection methodology: current challenges and solutions // *Oilfield Engineering*. 2023(1):35–40. (In Russ.)
[https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-1\(649\)-35-40](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-1(649)-35-40)]
4. Сингуров А. А., Дерябин П. Г. Инспекция оборудования с учетом факторов риска в компании «Сахалин Энерджи» // *Газовая промышленность*. 2018. № 12 (778). С. 114–121 [Singurov A. A., Deryabin P. G. Risk-based inspection in Sakhalin Energy Company // *GAS Industry of Russia*. 2018;(12):114–121. (In Russ.)]
5. Вертинская О. В., Климова И. В., Бриков А. В., Александрович С. И. Сравнение методик расчета инспекционного интервала при реализации риск-ориентированного подхода к инспекции технологического оборудования // *Безопасность труда в промышленности*. 2023. № 7. С. 21–27.
<https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-7-21-27> [Vertinskaya O.V., Klimova I.V., Brikov A.V., Alexandrovich S.I. Comparison of methods for calculating the inspection interval in the implementation of a risk-based approach to the inspection of the process equipment // *Occupational Safety in Industry*. 2023;(7):21–27. (In Russ.)
<https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-7-21-27>]
6. Хайдер С., Марк Ф., Лисанов М. В., Кручинина И. А. Зарубежный опыт использования риск-ориентированного подхода при эксплуатации технических устройств на нефтегазовых объектах // *Безопасность труда в промышленности*. 2015. № 8. С. 24–30 [Haider S., Mark F., Lisanov M.V., Kruchinina I. A. Foreign experience in using a risk-based approach when operating technical devices at oil and gas facilities // *Occupational Safety in Industry*. 2015;(8):24–30. (In Russ.)]
7. Бриков А. В., Александрович С. И. Расчет инспекционного интервала с применением риск-ориентированного подхода по методике API RP 581 // *Газовая промышленность*. 2023. № 2. С. 44–53 [Brikov A. V., Alexandrovich S. I. Calculation of the inspection interval using the risk-based inspection methodology according to API RP 581 // *Gas Industry of Russia*. 2023;(2):44–53. (In Russ.)]
8. Бриков А. В., Александрович С. И., Белкин Д. С., Штейн А. М., Осипов С. П. Алгоритм расчета инспекционного интервала технологического трубопровода с применением риск-ориентированного подхода по методике API 581 // *Безопасность труда в промышленности*. 2023. № 4. С. 75–83.
<https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-4-75-83> [Brikov A. V., Alexandrovich S. I., Belkin D. S., Shteyn A. M., Osipov S. P. Algorithm for calculating the inspection interval of a process pipeline using a risk-oriented approach according to the API 581 methodology // *Occupational Safety in Industry*. 2023;(4):75–83. (In Russ.)
<https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-4-75-83>]
9. Бриков А. В., Александрович С. И., Климова И. В. Расчет инспекционного интервала пружинного предохранительного клапана с применением риск-ориентированного подхода по методике API RP 581 // *Газовая промышленность* 2023. № 11(856). С. 116–127 [Brikov A. V., Alexandrovich S. I., Klimova I. V. Calculation of inspection interval for spring safety valve using risk-based approach according to API RP 581 methodology // *Gas Industry of Russia*. 2023;(11):116–127. (In Russ.)]
10. SINTEF (2002) Offshore Reliability Data (OREDA). A Handbook Prepared by SINTEF Technology and Society on the Behalf of the OREDA Project, 4th Edition. ISBN 82-14-02705-5. 2002. p. 408.

Боровикова Софья Агакишиевна: инженер по коррозии, ООО «Арктик СПГ 2»

Количество публикаций: 5

Область научных интересов: теоретические и практические аспекты коррозии, технического надзора, инспекции с учетом факторов риска

Контактная информация:

Адрес: 629309, г. Новый Уренгой, мкр. Славянский, д. 9, ком. 117
sofiya.borovikova@sakhalin2.ru

Липатов Роман Александрович: инженер по коррозии, ООО «Арктик СПГ 2»

Количество публикаций: 2

Область научных интересов: материаловедение и технологии материалов, теоретические и практические аспекты коррозии, технического надзора, инспекции с учетом факторов риска

Контактная информация:

Адрес: 629309, г. Новый Уренгой, мкр. Славянский, д. 9, ком. 117

Roman.lipatoff@gmail.com

Александрович Сергей Игоревич: заместитель начальника отдела технического надзора завода СПГ, ООО «Арктик СПГ 2»

Количество публикаций: 6

Область научных интересов: промышленная безопасность, технический надзор, инспекция с учетом факторов риска, контроль технического состояния

Scopus Author ID: 58450128700

Контактная информация:

Адрес: 629309, г. Новый Уренгой, мкр. Славянский, д. 9, ком. 117

alexandrovich_si@mail.ru

Бриков Александр Валерьевич: кандидат технических наук, начальник сектора материаловедения и коррозии управления целостности, ООО «Арктик СПГ 2»

Количество публикаций: 60

Область научных интересов: теоретические и практические аспекты коррозии, технического надзора, инспекции с учетом факторов риска

Scopus Author ID: 16644748900

SPIN-код: 7348-0067

Контактная информация:

Адрес: 629309, г. Новый Уренгой, мкр. Славянский, д. 9, ком. 117

alex_v_brikov@list.ru

Статья поступила в редакцию: 03.06.2024

Одобрена после рецензирования: 03.09.2024

Принята к публикации: 23.09.2024

Дата публикации: 27.12.2024

The article was submitted: 03.06.2024

Approved after reviewing: 03.09.2024

Accepted for publication: 23.09.2024

Date of publication: 27.12.2024