

УДК 66.023.2

**ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТЫ ХИМИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННОГО ГАММА-
ПРОЦЕНТНОГО РЕСУРСА**

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ РОБОТИ ХІМІЧНОГО
ОБЛАДНАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДИФІКОВАННОГО ГАММА-
ВІДСОТКОВОГО РЕСУРСУ**

**FEATURES PREDICTION OF WORKING CHEMICAL EQUIPMENT BY THE
INSTRUMENTALITY OF MODIFY GAMMA-PERCENTAGE RESOURCE**

Топоров А.А., Боровлев В.Н., П.В. Третьяков, А.А. Акусова (ДонНТУ)

Топоров А.А., Боровльов В.М., Трет'яков П.В., Акусова О.А. (ДонНТУ)

Toporov A.A., Borovlyov V.N., Tretyakov P.V., Akysova A.A. (DonNTU)

Разработана методика расчета модифицированного гамма-процентного ресурса обечаек с учетом технологических процессов, влияющих на их функционирование. Предложено использовать в этой методике критерии функционирования.

Розроблена методика розрахунку модифікованого гамма-відсоткового ресурсу оболонок, враховуючи технологічні процеси, які впливають на їх функціонування. Запропоновано використовувати в цій методиці критерії функціонування.

Method calculating has influence modify gamma-percentage resource shells subject to manufacturing process, have an influence on their function. Offer to make criterion of functioning in this method.

ХИМИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ДИАГНОСТИКА, ГАММА-ПРОЦЕНТНЫЙ РЕСУРС, КОРРОЗИЯ, ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ОТЛОЖЕНИЯ

ХІМІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ, ДІАГНОСТУВАННЯ, ГАММА-ВІДСОТКОВИЙ РЕСУРС, КОРОЗІЯ, ТЕРМІЧНИЙ ОПІР, ВІДКЛАДАННЯ

CHEMICAL EQUIPMENT, DIAGNOSTICS, GAMMA-PERCENTAGE RESOURCE, CORROSION, THERMAL RESISTANCE, DEPOSITION

Оборудование химической промышленности характеризуется сложными условиями работы, длительными сроками работы, значительными температурами и давлениями, непрерывностью протекания технологических процессов, работой с токсичными пожаро-взрывоопасными средами, высокой степенью агрессивности окружающей среды, токсичными и отравляющими рабочими средами, вредными условиями труда[1].

Отсутствие контроля за техническим состоянием оборудования или его некачественное выполнение может привести не только к нарушению условий его эксплуатации, но и к преждевременному прекращению функционирования наиболее подверженных деградационным процессам элементов оборудования, остановке технологических процессов, разрушению оборудования и связанному с этим материальному ущербу, а также таким тяжелым последствиям, как возникновение пожара, взрыва, загрязнение окружающей среды и гибели людей, т.е. возникновения и развития аварий. Одним из способов предотвращения возникновения и развития аварий является своевременное и качественное выполнение диагностических мероприятий и проведение анализа полученных результатов, принятие своевременных решений по дальнейшим действиям с объектом. [2]

Каждый вид оборудования требует индивидуального подхода проведения прогнозирования отличающихся назначением, физической сущностью, быстродействием, точностью, диапазоном измерений и т.п.

Одним из методов прогнозирования работы ответственного оборудования, получившим широкое распространение, является определение гамма-процентного ресурса. [3] Согласно данной методике прогнозируют изменение геометрических параметров элемента. В основном - минимальная вероятная толщина стенок элемента, который подвергается наиболее сильному воздействию деградационных процессов.[4] Причем измерение толщины проводят в контрольных точках, которые являются характерными для протекания деградации.

Измерение толщин в характерных точках элементов оборудования проводят через регламентированный промежуток времени, который зависит в основном от степени влияния протекающих процессов на оборудование. Как правило деградационные процессы комплексно воздействует на элементы оборудования. Согласно методике определения гамма-процентного ресурса, то в ней определяется обособленно толщина стенки под воздействием деградационных коррозионно-эрозионных процессов.

Рассмотрим один из распространенных элементов химического оборудования – цилиндрические обечайки. Это корпуса аппаратов, магистральные и технологические трубопроводы, трубчатка в теплообменных аппаратах, емкости для хранения и т.п.

Основными процессами, протекающими в указанных элементах являются:

- движения потоков жидкость - жидкость, жидкость - газ с отличающимися температурами и давлениями, в различных конструктивных оформлениях: соприкосновение потоков или контактирование через промежуточную стенку; прямоток, противоток, перекрестное или комбинированное течение потоков.
- охлаждение или нагрев рабочих или вспомогательных сред путем протекания теплопередачи;
- организация движения потоков рабочих и вспомогательных сред путем создания давления определенной величины, необходимой для прохождения гидравлического сопротивления элементов.

Общие критерии функционирования обечаек:

$$S_{MIN} \rangle S_{ОТБ} \quad (1)$$

$$\Delta t_{CP} \rangle [\Delta t_{CP}] \quad (2)$$

$$\Delta P_{CP} \rangle [\Delta P_{CP}] \quad (3)$$

Условие (1), учитывающее напряженно-деформированное состояние обечайки, описывает критерии функционирования, исходя из условия прочности. Условие (2), учитывающее процесс теплопередачи, описывает критерии функционирования исходя из условия теплопроводности через многослойную стенку. Условие (3), учитывающее гидравлическое течение потоков, описывает критерий функционирования исходя из условия изменения гидравлического сопротивления.

В процессе эксплуатации химического оборудования происходит постепенное накопление различного типа повреждений и возникновение дефектов. [5,6] Одним из наиболее распространенных типов повреждений является коррозионно-эрозионный износ, воздействие которого учитывается при выборе номинальной толщины стенки. При этом начальная толщина стенки уменьшается, приближаясь к минимально допустимой. Другой тип повреждения связан с ухудшением механических характеристик материала и, как следствие, снижением допускаемых напряжений. Оба типа повреждения приводят к постепенному уменьшению допустимого внутреннего давления в обечайке. Допустимое давление не должно опускаться ниже рабочего.

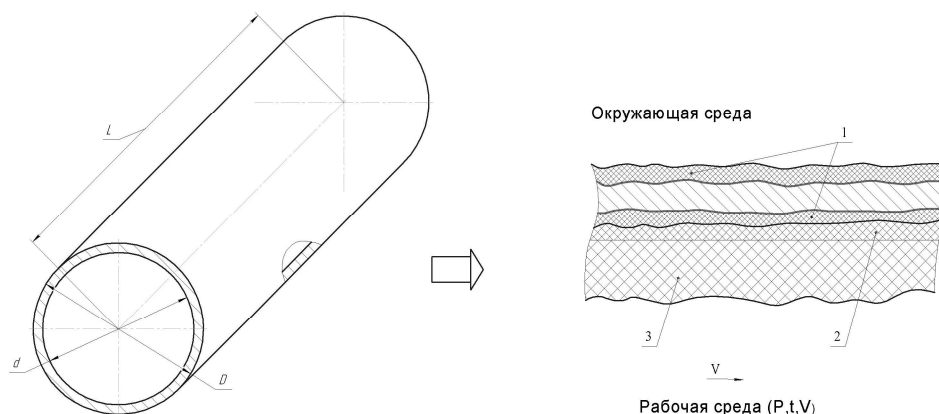


Рисунок 1.- Фрагмент обечайки, подверженный деградационным процессам

1 – зоны протекания коррозионных процессов; 2 – зона протекания эрозионных процессов; 3 – зона образования отложений.

Рассмотрим основные условия эксплуатации обечайки более подробно. Условие эксплуатации из условия прочности, учитывающее толщину стенки[7]:

$$S_{MIN} \rangle S_{ОТБ}$$

где S_{MIN} – минимальная толщина стенки, м,

$S_{ОТБ}$ – отбраковочная толщина стенки, м

Определяющим при оценке остаточного ресурса из условия прочности обечаек является расчет на действие внутреннего давления. Эксплуатация обечайки считается возможной, если фактическая толщина стенки всех элементов превышает отбраковочную. При определении отбраковочной толщины стенки оценивается несущая способность элементов в целом, в

отличие от проверочного расчета, когда определяется напряжение в наиболее опасной точке.

$$S_{\text{ОТБ}} = \frac{n \cdot P \cdot \alpha \cdot D_H}{2(R_1 + n \cdot R)}; \text{ при } \frac{R_2^H \cdot m_3}{R_1^H \cdot m_2} \geq 0.75$$

$$S_{\text{ОТБ}} = \frac{n \cdot P \cdot \alpha \cdot D_H}{2(0.9 \cdot R_2^H \cdot m_3 + n \cdot R)}; \text{ при } \frac{R_2^H \cdot m_3}{R_1^H \cdot m_2} < 0.75$$

где $S_{\text{ОТБ}}$ – толщина стенки обечайки, при котором запрещается эксплуатация, м;

P – рабочее давление в обечайке, МПа;

D_H – наружный диаметр элемента обечайки, м;

n – коэффициент перегрузки рабочего давления в обечайке,

R_1^H – нормативное сопротивление, равное наименьшему значению временного сопротивления разрыву материала обечайки, принимаемое по ГОСТу или ТУ; МПа,

R_2^H – нормативное сопротивление. Равное наименьшему значению предела текучести при растяжении, сжатии и изгибе материала стенок, принимаемое по ГОСТу или ТУ, МПа,

α – коэффициент несущей способности, $\alpha = 1$, для труб, конических переходов, выпуклых заглушек эллиптической формы; для отводов гладких и сварных; для отводов трубы радиусом R к наружному диаметру D .

Расчет остаточного ресурса обечайки по минимальной вероятной толщине стенок труб. Среднеквадратическое отклонение замеряемой толщины:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (S_K - S_{CP})^2},$$

$$S_{CP} = \frac{\sum_{i=40}^N S_K}{N}$$

где N – число участков замера (если $N < 10$, то σ не вычисляют, т.к. точность ее оценки при этом недостаточна)

S_K – значение замеренной толщины;

S_{CP} – среднее значение замеренной толщины.

Вероятная минимальная толщина стенки с учетом не контролируемых участков поверхности определяют для доверительной вероятности 95% применительно ко всем промышленным химическим объектам:

$$S_{MIN} = S_{CP} - 2 \cdot \sigma$$

При необходимости более точной оценки остаточной толщины стенки на каком-либо участке число измерений N увеличивают, имея ввиду, что уменьшение ошибки контроля пропорционально \sqrt{N} .

Средняя скорость коррозии стенки элемента обечайки определяется по формуле:

$$V_{CP} = \frac{S_K - S_{MIN}}{\tau}$$

Где τ – время эксплуатации, лет

Остаточный ресурс объекта определяется по формуле[8]:

$$\tau = \frac{S_{MIN} - S_{\text{ОТБ}}}{V_{CP}}$$

Следует отметить, что определение остаточного ресурса по коррозионно-эрозионный износу толщин стенок элементов химического оборудования является главным, но не единственным критерием оценки работоспособности. Рассмотрим критерии, благодаря которым возможно оценить или прогнозировать ресурс работы оборудования химико-технологических комплексов.

В теплообменном оборудовании (кожухотрубчатые теплообменники) существенным фактором, влияющим на условия эксплуатации, является термическое сопротивление стенок. Термическое сопротивление слоев коррозионных процессов и отложений сложно измерить. Учесть данный фактор возможно только косвенно. Одним из параметров, которые возможно измерить является температура. Температура рабочей среды является технологическим параметром, который измеряется во многих химических процессах на входе и выходе из оборудования. Тогда эксплуатация химического оборудования из температурного условия:

$$\Delta t_{CP} \in [\Delta t_{CP}] - \text{для теплообменного оборудования};$$

Допускаемые $[\Delta t_{CP}]$ – должны иметь верхнюю и нижнюю границу для различных условий работы, исходя из заданных параметров технологического процесса.

Средняя разность температур определяется следующим образом[9]:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln(\Delta t_B / \Delta t_M)}$$

где Δt_B Δt_M - большая и меньшая разности температур на концах оборудования

Значение величина Δt_{CP} имеет границы, при которых эксплуатация химического оборудования возможна. Для разных видов оборудования, рабочих сред, условий эксплуатации, длительности использования оборудования, технологических условий протекания процессов доверительный интервал будет иметь различную величину.

В главном уравнении теплопередачи [8]:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{CP}$$

где Q –тепловой поток (расход передаваемой теплоты), Вт;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² K);

Δt_{CP} – средняя разность температур горячего и холодного теплоносителей, К.

Коэффициент теплопередачи определяется следующим образом, исходя из образованных отложений:

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_{BH} \cdot d_{BH}} + \sum \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_{HAP}}{d_{BH}} + \frac{1}{\alpha_{HAP} \cdot d_{HAP}} + \sum \frac{r_{OTL}}{d_{OTL}}}$$

Тепловая проводимость отложений на стенках зависит от рода теплоносителя, его температуры и скорости, а также от материала стенки, температуры нагревающей среды. Точные данные, касающиеся толщин отложений можно получить только диагностическим путем, измерением приборами неразрушающего контроля. Проведение измерений термических сопротивлений отложений возможно только экспериментальным путем. При уменьшении коэффициента теплопередачи средняя разность температур будет увеличиваться.

Преобразовав главное уравнение теплопередачи получим:

$$\Delta t_{CP} = \frac{Q}{k \cdot F}$$

Данные формулы можно применить для тех случаев, когда значения коэффициента теплопередачи для теплоносителей можно считать постоянными. Для общего случая определение поверхности теплопередачи выполняют по дифференциальному уравнению методом интегрирования.

Скорость изменения рабочей средней температуры горячего и холодного теплоносителей определяется по формуле:

$$V_{CP.T} = \frac{\Delta t_{CP} - [\Delta t_{CP}]}{\tau}$$

Где τ – время эксплуатации, лет

Это условие справедливо, если не принимать во внимание фазы работы, когда температура может значительно отличаться от рабочей, а именно в процессе ввода и вывода оборудования из эксплуатации.

Остаточный ресурс объекта определяется по формуле:

$$\tau_T = \frac{\Delta t_{CP} - [\Delta t_{CP}]}{V_{CP.T}}$$

Также одним из критериев работоспособности химического оборудования может являться изменение его условия гидравлического течения потоков. Эксплуатация элементов химического оборудования из условия гидравлического течения потоков:

$$\Delta P_{CP} \rangle [\Delta P_{CP}]$$

В основе оценки остаточного ресурса из условия обеспечения гидравлического течения потоков является определение изменений гидравлического сопротивления обечаек. Гидравлическое сопротивление является технологическим параметром, который измеряется во многих химических процессах на входе и выходе из оборудования. В общем случае ΔP_{CP} вычисляется по формуле:

$$\Delta P_{CP} = \Delta P_{СК} + \Delta P_{ТР} + \Delta P_{М.С.} + \Delta P_{ПОД} + \Delta P_{ДОП}$$

где $\Delta P_{СК}$ – потери давления на создания скорости потока на выходе из системы; $\Delta P_{ТР}$ – потери давления на преодоление сопротивления трения, $\Delta P_{М.С.}$ – потери давления на преодоление местных сопротивлений; $\Delta P_{ПОД}$ – потери давления на подъем жидкости. $\Delta P_{ДОП}$ – разность давления в пространстве нагнетания и в пространстве всасывания.

Вышеуказанные величины имеют постоянную величину, кроме $\Delta P_{ТР}$, которая изменяет свое значение после образования и накопления отложений.

Формула определения мощности подающего насосного оборудования $\Delta P_{ТР}$, входит как составляющая ΔP_{CP} [10]:

$$N = \frac{V \cdot \Delta P_{CP}}{1000 \cdot \eta}$$

где V – объемный расход жидкости, м³/с, ΔP_{CP} – повышение давления, которое сообщается насосом перекачиваемому рабочему потоку. ΔP_{CP} равно полному гидравлическому сопротивлению системы трубопроводов и химического оборудования.

$$V = \omega \cdot f$$

где f – площадь поперечного сечения потока, м²;

ω – скорость истечения жидкости, м/с.

Выразив из формулы определения мощности гидравлическое сопротивление системы, получим:

$$\Delta P_{CP} = \frac{N \cdot 1000 \cdot \eta}{V}$$

Необходимо заметить, что для гидравлической системы существует понятие напорной характеристики, то есть взаимосвязь между напором и производительностью. Изменение сечения приводит к изменению производительности. График характеристики системы пойдет более круто. Рабочая точка сдвинется влево и производительность насоса снизится. (рис.2)

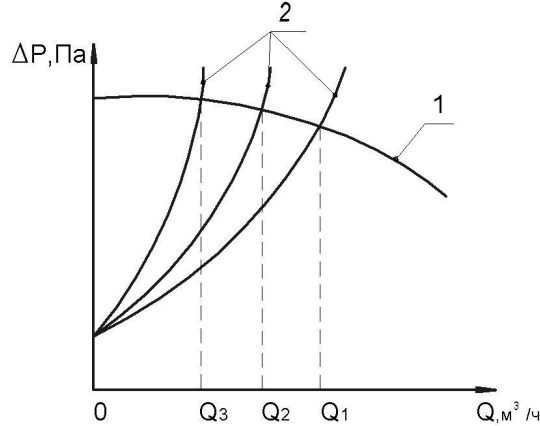


Рисунок 2 – Зависимость изменения производительности насоса от изменения характеристики системы.

1 – характеристика насоса, 2 – характеристики системы.

Соответственно $Q_1 > Q_2 > Q_3$.

Для получения ресурса работы по критерию образования отложений и увеличения сопротивления системы во времени можно предложить следующие зависимости:

$$\tau_T = \frac{\Delta P_{CP} - [\Delta P_{CP}]}{V_{CP, \Delta P}}$$

В случае протекания деградационных процессов по линейной модели. Как правило, деградационные процессы протекают по нелинейной модели [11]

$$\delta = a \cdot \tau^M$$

где a – параметр, определяющийся из условий работы, M – определяется из экспериментальных исследований.

В дальнейшем будем полагать, что параметр a имеет нормальное распределение. При $M=1$ деградационный процесс происходит с постоянной скоростью a , при $M>1$ ускоряется при эксплуатации, при $M<1$ – замедляется. В этом случае общее условие работоспособности элементов химического оборудования будет иметь вид:

$$\begin{array}{l} S_{MIN} \rangle S_{OTB} \\ \Delta t_{CP} \rangle [\Delta t_{CP}] \\ \Delta P_{CP} \rangle [\Delta P_{CP}] \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} S_{MIN} \rangle (S_{OTB} - 2 \cdot \sigma) \cdot \tau^M \\ \Delta t_{CP} \rangle F([\Delta t_{CP}]) (\tau^M) \\ \Delta P_{CP} \rangle F([\Delta P_{CP}]) (\tau^M) \end{array}$$

Предложенная модифицированная методика определения гамма-процентного элементов химического оборудования позволяет определить остаточный ресурс на основе критериев работоспособности. Так для обечаек, в которых протекают: коррозия, образование отложений, теплопередача через многослойную стенку - предложено использовать три критерия. Эта методика позволяет установить влияние технологических процессов на ресурс оборудования.

Литература:

1. **Муромцев Ю.Л.** Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах. М.: Химия, 1990, с.144
2. **Белов П.Г.** Теоретические основы системной инженерии безопасности – М.: ГНТБ «Безопасность» МИБ СТС. – 1996, с.428,
3. **Генералов М.Б.** Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Т IV-12, М: Машиностроение, 2004 832 с.
4. **Топоров А.А.** Новый подход к анализу техногенно опасных ситуаций на технологических производствах / Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія. Випуск 95/ Донецьк: ТОВ «Лебідь», 2005. С. 126-130.
5. **Топоров А.А., Боровлев В.Н., Третьяков П.В.** Изменение расчетных схем элементов оборудования в процессе эксплуатации// Машиностроение и техносфера XVII Международной научно-технической конференции. ТЗ. Донецк 2010.-с.169-174
6. **Болотин В.В.** Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990, 448с.
7. **Бородавкин П.Л., Березин В.Л.** Сооружение магистральных трубопроводов: Учебник для вузов- М: Недра, 1987 с.350
8. **ОСТ 153-39.4-010-2002** Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений
9. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. - М., 2005. – 753 с.
10. **Дытнерский Ю.И.** Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов – В 2-х книгах: Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. М.: Химия, 1995.-400 с.;
11. **Капур К., Ламберсон Л.** Надежность и проектирование систем – М.: Издательство «Мир» перевод с английского под редакцией Ушакова И.А. – 1980, 605 с.,