

**Решение задач управления сроками и объемами ремонтов
трубопроводной системы предприятия на модели с учетом оценки
технического состояния**

Мырзин Г.С., Мухин О.И., Мошев Е.Р.

В статье рассмотрена модель, позволяющая описывать, прогнозировать и управлять трубопроводной системой предприятия во времени. На модели решаются задачи управления сроками и объемами ремонтов трубопроводов, обеспечивающие максимальный межремонтный пробег производственных блоков предприятия при заданных затратах.

**The model-based analyses of trim-time and repair volumes control for
plant's pipeline system by taking into according its technical state**

Myrzin G.S., Moukhin O.I., Moshev E.R.

The model giving possibilities to describe, predict and control in time of pipeline system enterprise is considered in this article. On this model the problems of trim-time and repair volumes control for plant's pipeline system are solved, that is ensuring the maximum preventive-maintenance overhaul of production sections enterprise by the fixed repairing expenditures.

Введение

В нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и других отраслях промышленности одними из самых металлоемких и ответственных конструкций являются технологические трубопроводы, определяющие в значительной мере эффективность и безопасность функционирования предприятия. Современные условия организации производственного процесса на предприятии требуют сокращения времени простоя и увеличения межремонтного пробега всех его трубопроводов. Однако старение парка технологического оборудования, происходящее в настоящее время, приводит к неминуемому увеличению частоты, продолжительности и объемов ремонтных работ. В результате управление сроками и объемами ремонтов значительно осложняется выполнением операций анализа и прогнозирования технического состояния всей трубопроводной системы предприятия. При этом выбор управляющих воздействий, заключающихся в замене изношенных участков трубопроводов, должен обеспечивать максимальный межремонтный пробег производственных блоков с заданными материальными и временными затратами. Дополнительно проведение ремонтов осложняется

большим количеством трубопроводов, которое на крупном предприятии может достигать нескольких тысяч единиц. Следствием этого является ряд проблем, среди которых можно выделить следующие: высокая трудоемкость выполнения вспомогательных операций поиска и обработки информации по трубопроводам, неизбежность появления ошибок и искажения информации, многократное дублирование одних и тех же действий, субъективность в принятии решений о проведении ремонтов по техническому состоянию, сложность контроля результата работ со стороны руководства, необходимость привлечения большого количества специалистов.

В качестве средства для решения вышеуказанных проблем авторы разработали модель, которая описывает техническое состояние трубопроводной системы предприятия и её эволюционирование во времени в зависимости от кинетики коррозионно-эрозионного износа и управляющих воздействий. На основе информации о ряде технических состояний в модели рассчитываются отбраковочные толщины стенки, прогнозируются износ и остаточный ресурс элементов трубопровода на указываемый пользователем момент времени. Оценка полученных расчетных и прогнозируемых параметров позволяет определить потребность в проведении ремонтов и сформировать список возможных вариантов замены изношенных элементов. Выбор наилучшего варианта из сформированного списка позволяет решать задачи управления сроками и объемами ремонтов по техническому состоянию, как для одного трубопровода, так и для всех трубопроводов производственных блоков предприятия. Краткому описанию данной модели и решаемых с её помощью задач посвящена настоящая статья.

Модель трубопроводной системы

В модели трубопроводная система представлена совокупностью соединяющихся между собой трубопроводов, принадлежащих к различным производственным блокам предприятия. Отдельный трубопровод рассматривается как топологический объект, состоящий из соединенных между собой элементов. Параметры и топология трубопровода, как показывает практика, достаточно часто изменяются на протяжении всего периода эксплуатации в результате смены технологического режима, проведения ремонта или реконструкции, а также процесса старения. Поэтому трубопровод, у которого изменяется техническое состояние, в общем случае описывается в виде последовательности состояний, регистрируемых в дискретные моменты времени и характеризующих совокупностью множеств технологических, эксплуатационных и конструктивных параметров. Функциональные соотношения на данных множествах позволяют прогнозировать техническое состояние и планировать ремонтные работы в зависимости от времени:

$$Y = F(P, K, t), P \in M,$$

где Y – множество выходных параметров; P – множество технологических и эксплуатационных параметров; K – топологическое описание конструкции трубопровода и его элементов; t – прогнозирующая переменная (время), граничными значениями которой являются дата монтажа трубопровода и дата перехода в предельное состояние; M – множество допустимых значений параметров согласно требованиям источников [1,2] и другой нормативно-технической документации. Топологическое описание K характеризует пространственное расположение и связи между соединяющимися элементами трубопровода. Элементы образуют разветвленные цепочки из прямолинейных и гнутых участков с различным диаметром и толщиной стенки, каждая из которых описывается следующим образом:

$$\begin{cases} K = \langle E, C \mid E \in M, C \subset \langle E, \leq \rangle \rangle, \\ n_c = n_e + n_o - 1, \end{cases}$$

где E – множество элементов; C – множество соединений, образованных между элементами; n_c – количество соединений; n_e – количество элементов; n_o – количество замкнутых контуров.

В течение всего периода эксплуатации трубопровода происходит процесс естественного старения, вызванный коррозионно-эрозийным износом. В качестве данных, отражающих информацию об этом процессе в модели, используются фактические значения толщин стенок элементов трубопровода, измеренные неразрушающими методами контроля при проведении таких периодических работ технического обслуживания как ревизия и диагностирование. Фактические значения толщины стенки не должны достигать отбраковочных величин, при которых эквивалентное напряжение в элементе близко к допускаемому:

$$s_{ok} \rightarrow \sigma_{fk} \approx \sigma_{dk},$$

где k – порядковый номер элемента, $k = \overline{1, n_e}$; s_{ok} – отбраковочная толщина стенки; σ_{fk} – наибольшее эквивалентное напряжение в сечении элемента при оценке статической прочности под действием несамоуравновешенных нагрузок; σ_{dk} – допускаемое напряжение марки стали элемента при рабочей температуре.

Расчет эквивалентных напряжений в элементе производится в соответствии с источником [3] с учетом действия внутреннего давления транспортируемой среды и весовых нагрузок на конструкцию трубопровода:

$$\sigma_{fk} = \sqrt{0.75 \cdot \sigma_{pk}^2 + \sigma_{zk}^2 + 3 \cdot \sigma_{tk}^2},$$

где σ_{pk} – среднее окружное напряжение от внутреннего давления; σ_{zk} – осевое напряжение от осевой силы и изгибающего момента; σ_{tk} –

напряжение от кручения. Напряжения σ_{zk} и σ_{Tk} рассчитываются в зависимости от внутренних усилий, определенных в результате решения системы линейных уравнений, построенной методом перемещений. Для этого предварительно по топологическому описанию трубопровода составляется стержневая расчетная схема, узловыми точками которой являются места соединений элементов, отводы, переходы, врезки, тройники, арматура, компенсаторы, опоры и подвески, а также технологические аппараты. В результате система линейных уравнений, полученная по данной расчетной схеме, в векторном виде записывается следующим образом:

$$[R_F] \rightarrow [Z] \cdot [r] + [R] = 0,$$

где $[R_F]$, $[Z]$ – векторы фактических внутренних усилий и перемещений в узловых точках; $[r]$ – вектор реактивных воздействий (сил и моментов) от единичных перемещений; $[R]$ – вектор реактивных воздействий от весовой нагрузки.

Значения фактической толщины стенки не должны выходить за допустимые пределы, как на момент последнего измерения, так и в течение всего периода времени до следующего, официально задаваемого, контроля. Для учета данного ограничения определяются прогнозируемые значения остаточного ресурса элементов в соответствии с методикой расчета скорости коррозии стальных технологических трубопроводов по реперным точкам [4]:

$$\tau_{tk} = \frac{s_{Fk} - s_{Ok}}{w_k} - t,$$

где τ_{tk} – остаточный ресурс; s_{Fk} – фактическая толщина стенки; w_k – скорость коррозии в реперной точке. Аналогичным образом определяется прогнозное значение толщины стенки элементов на момент времени t из следующего соотношения:

$$s_{tk} = s_{Fk} - t \cdot w_k.$$

Рассмотренная модель позволяет сформировать ряд задач управления сроками и объемами ремонтов трубопроводной системы предприятия с учетом оценки технического состояния. Описание трех таких задач приведено ниже.

Задачи управления ремонтами

1. Задача управления ремонтами одного трубопровода. По результатам прогнозирования определяется перечень изношенных элементов, замена которых должна быть выполнена в период плановой остановки производственного блока на ремонт и до наступления момента времени t :

$$s_{tk} \geq s_{Ok} \vee \tau_{tk} < \tau_M \cdot \Gamma, \tag{1}$$

τ_M – межремонтный пробег производственного блока по плану-графику ремонтов; r – коэффициент запаса, выбираемый в зависимости от группы и категории трубопровода. Изношенные элементы требуется заменить новыми с такой толщиной стенки, при которой трубопровод без ремонта отработает заданное количество межремонтных циклов при наименьших суммарных затратах. При этом новый элемент должен отвечать нормативным требованиям по технологии проведения ремонта, а также свариваемости с соседними элементами и прочности трубопровода согласно документам [1-3]. Множество допустимых решений G данной задачи описывается системой соотношений:

$$\begin{cases} s_{Nk} - \Delta s_k \leq s_{Nk}^* \leq s_{Nk} + \Delta s_k, \\ s_{Ok} + w_k \cdot \tau_M \cdot n_M \cdot r \leq s_{Nk}^*, \\ E_k^* \subset M, \end{cases} \quad (2)$$

а критерий оптимальности имеет вид:

$$\sum_{k=1}^{n_E} c_k^* \rightarrow \min_{s_{Nk}^* \in G},$$

где s_{Nk}^* , s_{Nk} – номинальная толщина стенки нового и изношенного элемента соответственно; Δs_k – допустимая разница в толщине стенки с соседними элементами при образовании сварного соединения; n_M – заданное количество межремонтных циклов трубопровода; E_k^* – множество допустимых паспортно-технических параметров нового элемента (стандарт на элемент, стандарт на сталь, марка стали, тип элемента и др.); c_k^* – стоимость нового элемента, включающая стоимость монтажа, $c_k^* \propto s_{Nk}^*$.

Для примера рассмотрим задачу по замене одного изношенного элемента трубопровода, исходными данными которой являются результаты замеров толщины стенки и даты проведения ремонтов производственного блока при межремонтном пробеге четыре года (см. таблицу 1). Допустимыми решениями данной задачи являются приведенные в таблице 2 варианты замены изношенного элемента.

Таблица 1

Исходные данные задачи №1

Наименование изношенного элемента	Труба 89x5,5 сталь 20
Фактическая толщина стенки [мм] – дата замера	4,82 – 1996 3,83 – 2000
Даты проведения ремонтов	2000, 2004, 2008, 2012

Таблица 2

Допустимые решения задачи №1

Наименование параметра элемента	Изношенный элемент	Варианты замены		
Номинальная толщина [мм]	5,5	5	5,5	6
Остаточный ресурс [год]	3,816	8,148	10	11,85
Дата проведения замены	2000	2008	2008	2008
Относительная стоимость		0,91с	с	1,18с

2. *Задача управления ремонтами трубопроводов производственного блока.* По результатам прогнозирования остаточного ресурса и износа толщины стенки определяется перечень трубопроводов, подлежащих ремонту. В рамках ремонта выполняется замена изношенных элементов в соответствии с соотношением (1). Требуется определить такую оптимальную стратегию проведения ремонтов, чтобы при заданных общих затратах c_p был достигнут максимальный суммарный межремонтный пробег трубопроводов производственного блока. Множество допустимых решений G данной задачи описывается неравенствами (2) и системой соотношений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_j = \min \left(\frac{S_{Nk,j}^* - S_{Ok,j}}{W_{k,j}} \right), \\ n_{Mj} = \left\lfloor \frac{\tau_j}{\tau_M \cdot r} \right\rfloor, \\ \sum_{j=1}^{n_T} \sum_{k=1}^{n_E} c_{k,j}^* \leq c_p, \end{array} \right. \quad (3)$$

а критерий оптимальности примет вид:

$$\sum_{j=1}^{n_T} n_{Mj} \rightarrow \max, \quad s_N^* \in G \quad (4)$$

где j – порядковый номер трубопровода, $j = \overline{1, n_T}$; τ_j , n_{Mj} – остаточный ресурс и количество межремонтных циклов трубопровода; $\lfloor \cdot \rfloor$ – целая часть числа.

3. *Задача управления ремонтами трубопроводов производственного блока с учетом стоимости демонтажа элементов.* При управлении ремонтами целесообразно учитывать не только стоимость устанавливаемого элемента и его монтажа, но и стоимость демонтажа старого элемента. Однако если производится одновременная замена всех элементов трубопровода, то стоимость демонтажа будет существенно ниже, т.к. при этом уменьшается количество ремонтных операций и не требуется сохранения ремонтпригодности демонтируемых сварных

соединений. Поэтому трубопровод целесообразно ремонтировать до тех пор, пока стоимость ремонтов меньше стоимости замены всех его элементов или монтажа нового трубопровода с другой трассировкой. Множество допустимых решений данной задачи описывается системой соотношений (2,3) и следующим условием:

$$\sum_{k=1}^{n_E} (c_{k,j}^* + c'_{k,j}) < c_{Mj},$$

где $c'_{k,j}$ – стоимость демонтажа элемента; c_{Mj} – стоимость монтажа трубопровода. Критерий оптимальности для множества допустимых решений имеет вид (4).

Рассмотренные задачи управления сроками и объемами ремонтов трубопроводов относятся к задачам линейного программирования и решаются симплекс-методом либо другим аналогичным способом. Ограниченный объем публикации не позволяет здесь привести их решение.

Заключение

Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

- использование разработанной авторами модели позволяет описывать, прогнозировать и управлять техническим состоянием трубопроводной системы предприятия во времени;
- решение на модели ряда задач управления сроками и объемами ремонтов трубопроводов по техническому состоянию обеспечивает максимальный межремонтный пробег всех технологических блоков предприятия с заданными затратами.

Основная часть рассмотренной модели реализована в многопользовательской программной системе АСОД «Трубопровод» [5,6], разработанной при участии авторов и внедренной на предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез». Использование АСОД «Трубопровод» позволило сформировать базу данных по четырем тысячам трубопроводам данного предприятия, автоматизировать большую часть операций поиска и обработки технической информации, значительно упростить сложные операции анализа и прогнозирования технического состояния, а также уменьшить затраты на проведение ремонтных работ.

Список использованных источников

1. РД 38.13.004-86. Эксплуатация и ремонт технологических трубопроводов под давлением до 10,0 МПа (100 кгс/см²). – М.: Химия, 1988. – 288 с.
2. ПБ-03-585-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов. – М.: Госгортехнадзор, 2004. – 152 с.

3. РТМ 38.001-94. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. – М.: ВНИПИнефть, 1995. – 120 с.

4. Инструкции по определению скорости коррозии металла корпусов сосудов и трубопроводов на предприятиях Миннефтехимпрома СССР. – Волгоград: ВНИКТИнефтехимоборудование, 1983. – 19 с.

5. Мошев Е.Р., Мухин О.И., Рябчиков Н.М., Мырзин Г.С., Селезнев Г.М. Разработка автоматизированной системы для комплексного решения задач информационной поддержки и обеспечения промышленной безопасности технологических трубопроводов // Безопасность труда в промышленности. 2006. № 4 – С. 48-52.

6. Мырзин Г.С., Мошев Е.Р., Мухин О.И., Рябчиков Н.М. Автоматизация построения изометрических схем и ведения паспортной документации по технологическим трубопроводам // Промышленная и экологическая безопасность. 2007. № 5 – С. 48-51.

Пермский государственный технический университет, г. Пермь