

УДК 620.179

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ***А. Н. ПРУДНИКОВ***Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDK 620.179

RISK-BASED APPROACH IN ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF MAIN PIPELINES***A. N. PRUDNIKOV***

Аннотация. Рассмотрен риск-ориентированный подход при оценке технического состояния магистральных трубопроводов, использование марковской модели при анализе риска по параметрам напряженно-деформированного трубопровода и результатам неразрушающего контроля.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход, марковская модель, трубопровод.

Abstract. The risk-based approach is considered in assessing the technical condition of main pipelines, the use of the markov model in risk analysis based on the parameters of a stress-strain pipeline and the results of non-destructive testing.

Keywords: risk-based approach, markov model, pipeline.

Риск-анализ магистрального нефтепровода. При эксплуатации магистральных нефтепроводов, как и других объектов техносферы, возможны чрезвычайные ситуации с масштабными последствиями. Аварии и катастрофы последних десятилетий свидетельствуют о растущем риске для общества,двигающегося по пути технического прогресса. Поэтому, наряду с развитием техники, растет и проблематика обеспечения безопасности. Принцип «абсолютной безопасности», применяемый до недавнего времени, ставит целью не допустить никакую аварию, создать абсолютно безопасный объект, что априори невозможно и приводит к неготовности к авариям.

В настоящее время подход к возможности аварий существенно изменился и опирается на теорию риска. Теория риска исходит из того, что нельзя сделать объект абсолютно надежным, катастрофа заложена в объект и «только ждёт» своего проявления в виде результата развития событий. Общепринятый риск-ориентированный подход позволяет произвести количественный анализ уровня безопасной эксплуатации техногенного объекта посредством оценки риска возникновения опасных сценариев развития событий.

Наиболее широко используют следующее выражение для оценки риска аварии R :

$$R = PU,$$

где P – вероятность опасного события; U – последствия этого события.

На основании риск-анализа объекта можно определить не только уровень безопасности, но и, используя количественные показатели риска, обеспечить оптимальные режимы функционирования объекта.

Сложность и многогранность процесса возникновения и развития аварийных ситуаций не позволяет построить точные модели и выполнить точный прогноз аварий. Поэтому прогноз техногенных катастроф является вероятностной задачей, достоверность которого определяется адекватностью модели объекта.

Моделирование риска. Изменение технического состояния магистрального нефтегазопровода происходит под воздействием деградиционных процессов. Данные процессы закономерно рассматривать как совокупность процессов стохастического характера сложной технической системы, которые вызывают переход из одного состояния в другое под воздействием каких-либо причин. То есть любой этап жизненного цикла объекта – это результат развития цепей случайных событий.

При выборе модели математического описания случайных развивающихся процессов изменения параметров объекта технической природы приоритетно выглядит использование марковских моделей [1]. В рамках этого класса моделей объект рассматривается как совокупность возможных состояний и вероятностей перехода между этими состояниями.

Марковские модели нашли применение в вероятностном анализе безопасности сложных технических систем. Марковские модели обладают целым рядом полезных свойств и имеют хорошо развитый математический аппарат. Применительно к прогнозированию технического состояния и оценке риска эксплуатации объектов немаловажным является то, что для марковских моделей будущее состояние (прогноз) зависит лишь от последнего состояния объекта и не зависит от предыстории. Для марковской модели характерно протекание так называемых процессов без последствия, т. е. в модели отсутствуют обратные связи.

Имея в распоряжении размеченный граф состояний (матрицу переходных вероятностей $\|P_{ij}\|$) и начальное состояние системы, не сложно найти вероятность нахождения системы в состоянии k по рекуррентной формуле

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k-1) \|P_{ij}\| \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, n).$$

Марковский анализ является эффективным, но одновременно сложным и трудоемким методом предсказания надежности и безопасности систем. Для некоторых реальных задач применение марковских методов затруднено вследствие ограничений на размерность соответствующих математических моделей. Вместе с тем, развитие вычислительной техники постепенно решает проблему большой размерности марковских моделей, расчета параметров переходов и получения соответствующих матриц переходных вероятностей или систем уравнений.

При количественном анализе риска аварий на магистральном трубопроводе, являющемся сложным техническим объектом, с использованием марковских моделей удобнее рассматривать нефтепровод в виде иерархической марковской модели. Применять такое моделирование надо не ко всей системе, а к отдельным частям, т. е. провести разбивку, далее моделирование, затем объединение оценок показателей. На начальном уровне составляется марковская модель развития отдельных дефектов (повреждений, несоответствий и т. д.). На следующем этапе происходит объединение отдельных моделей в одну, соответствующую рассматриваемому участку магистрального нефтепровода, и расчет уровня риска масштабных аварий.

В графическом представлении элемент риск-ориентированной марковской модели выглядит следующим образом (рис. 1).

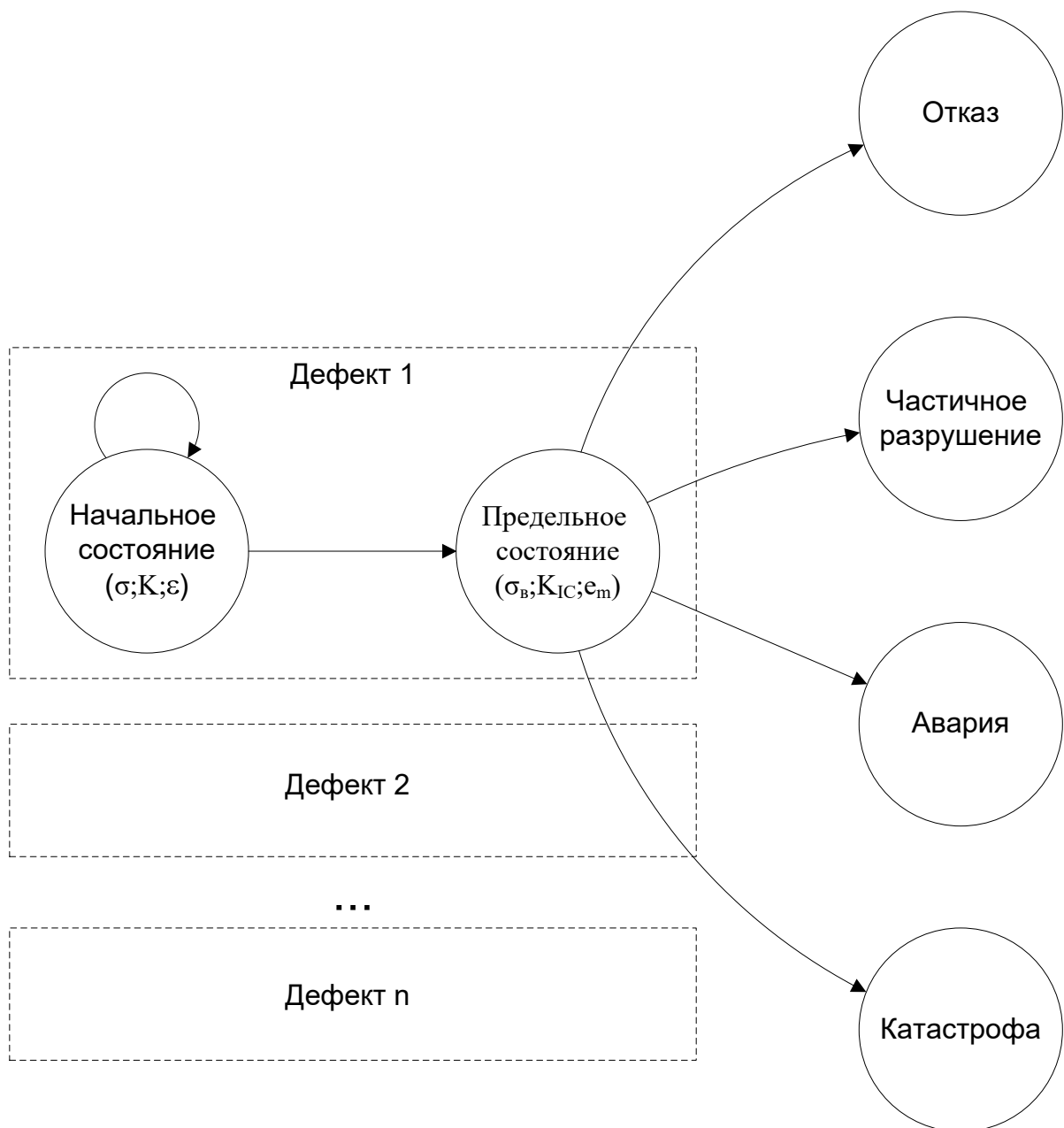


Рис. 1. Фрагмент риск-ориентированной марковской модели

Уровни тяжести последствий отказа по причине определенного сценария развития дефекта устанавливаются по величине риска и имеют условную градацию: отказ, частичное разрушение, авария, катастрофа.

Критерии оценки риска. Технический риск эксплуатации магистрального нефтетрубопровода оценивается вероятностью его разрушения. Если из рассмотрения исключить отказы вследствие природных воздействий, воздействий третьей стороны, нерасчетных перегрузок, ошибок при проектировании, ремонте или эксплуатации, то безопасность эксплуатации нефтетрубопровода определяется сохранением прочности по различным критериям разрушения.

В качестве критерия оценки состояния магистрального нефтетрубопровода можно выбрать характеристику объекта контроля, количественно описывающую механические, физические, геометрические, структурные и другие свойства. Количество критериев оценки состояния ограничивается информацией о трубопроводе и степенью корреляции с физико-механическим состоянием трубопровода или процессами деградации его свойств. Естественно, состояние объекта, определенное по конечному числу критериев, будет тем полнее, чем весомее является данный критерий.

Для нагруженных элементов магистрального нефтетрубопровода в качестве наиболее важных характеристик можно рассматривать напряжения, деформации, размеры и формы дефектов. В свою очередь, эти характеристики зависят от параметров эксплуатации (давление, температура, скорость), от геометрии и пространственного расположения участка, механических свойств применяемой стали.

Опыт эксплуатации магистральных нефтетрубопроводов показывает, что причиной возникновения и развития преобладающего количества аварийных ситуаций является нарушение целостности трубопровода. Разрушение происходит при переходе трубопровода в критическое состояние, вызванное следующими основными факторами:

- образование и рост усталостных и коррозионно-усталостных трещин;
- коррозионные повреждения (наружные, внутренние, стресс-коррозия);
- недопустимые пластические деформации.

Опираясь на статистику разрушений и теоретические исследования механизмов разрушения, можно выделить критерии разрушения магистральных нефтетрубопроводов, которыми являются статическая прочность, усталость, трещиностойкость [2].

При традиционных расчетах статической прочности нефтетрубопровода, не содержащего трещин, по критерию сопротивления вязкому разрушению определяют вероятность появления недопустимых деформаций, выраженную условием

$$\sigma \geq \sigma_T,$$

или вероятность разрушения

$$\sigma \geq \sigma_B,$$

где σ – действующее в элементе номинальное напряжение; σ_T – предел текучести; σ_B – предел прочности.

При эксплуатации магистральных нефтетрубопроводов возможно также образование и развитие трещин. Трещины возникают в локальных зонах, имеющих высокие уровни напряжения, пониженные характеристики механических свойств и концентраторы напряжений (технологические и эксплуатационные дефекты).

Рассмотрим кинетику трещины, воспользовавшись методами механики разрушения. Предельное состояние зоны разрушения, содержащей трещину, представляет собой зависимость между геометрическими размерами дефекта, характеристиками трещиностойкости зоны разрушения и действующими напряжениями.

Условие перехода трещины в нестабильное состояние можно описать уравнением Ирвина

$$K \leq K_{IC},$$

где K – коэффициент интенсивности напряжений (далее – КИН); K_{IC} – критическое значение КИН.

Расчет КИН реального дефекта трубопровода производится по максимально схожей с ним расчетной схеме, для которой зависимость КИН известна и может быть легко вычислена аналитически [3].

Следует отметить, что для определения прочности трубопровода с трещиной можно применять различные методы анализа стабильности трещин, использующие упругопластическую механику разрушения на основе критического значения коэффициента интенсивности деформаций K_{Iec} , или коэффициента трещиностойкости I_c , или J -интеграла.

В контексте количественной оценки риска разрушения магистрального трубопровода основная задача расчета состоит в определении вероятности достижения объектом предельных значений по рассматриваемым различным критериям разрушения. Вероятностное прогнозирование технических рисков нефтепровода базируется на данных технического диагностирования и НК, механики разрушения. В общем случае алгоритм оценки состояния магистрального нефтепровода по предлагаемой схеме будет включать следующие этапы:

- выявление потенциальных зон разрушения;
- анализ предельных состояний зон разрушения;
- определение вероятности достижения заданных видов предельных состояний;
- оценку риска отказа (разрушения).

Исходной информацией для построения оценочной модели технического состояния трубопровода служат результаты внутритрубной диагностики линейной части, которые представляют общую картину дефектности участка. Дефектоскопическая информация является важной, но не всеобъемлющей при комплексном анализе состояния нефтепровода. Для полноты оценки остаточного ресурса следует учитывать комбинации и влияния параметров эксплуатации.

Объективный учет взаимодействия всех параметров состояния магистрального трубопровода требует комплексного применения различных методов контроля. Так, традиционные методы дефектоскопии, применяемые после шурфования участков трубопровода, позволяют получить информацию об определенных анализируемых параметрах дефектов, а для установления ресурса нефтепровода с заданной поврежденностью необходимо учитывать данные измерения напряженно-деформированного состояния, описывающего локальные и общие напряжения трубопровода в реальных условиях функционирования.

Как отмечалось ранее, рассматривая магистральный нефтепровод в виде марковской модели, состоящей из набора нескольких возможных состояний, классифицируемых в зависимости от уровня риска в диапазоне от полностью безопасного до критического, мерой риска будет являться матрица переходных вероятностей. Переходные вероятности состояний определяются вероятностью нахождения значения рассматриваемого параметра предыдущего состояния в диапазоне значений, описывающих последующее состояние, или вероятностью достижения параметром величины предельного значения состояния, установленном нормативами [4].

В случае, когда параметр имеет нормальное распределение вероятность того, что по результатам представительной выборки измеренных значений среднее значение данного параметра x находится в интервале $[x_{\min}, x_{\max}]$, рассчитывается как

$$P = \Phi\left(\frac{\bar{x} - x_{\min}}{\sigma_x}\right) + \Phi\left(\frac{x_{\max} - \bar{x}}{\sigma_x}\right),$$

где Φ – нормированная функция Лапласа (интеграл вероятности); \bar{x} – математическое ожидание величины данного параметра по результатам оцениваемой выборки; σ_x – стандартное отклонение величины измеряемого параметра.

Если параметр ограничивается только верхним пределом x_{\max} или нижним пределом x_{\min} , то соответственно

$$P = \Phi\left(\frac{x_{\max} - \bar{x}}{\sigma_x}\right) + 0,5;$$

$$P = \Phi\left(\frac{\bar{x} - x_{\min}}{\sigma_x}\right) + 0,5.$$

Может иметь место случай, когда параметр имеет нормальное распределение и закон изменения подчиняется линейной зависимости, причем его скорость имеет параметры γ , σ_γ . Тогда вероятность достижения параметром, например, верхней границы x_{\max} через время t , равна

$$P = \Phi \left(\frac{x_{\max} - \bar{x} - \gamma t}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\gamma^2 t^2}} \right) + 0,5.$$

Заключение.

1. Проблема оценки рисков потенциально опасных объектов в настоящее время является достаточно актуальной и ее важность в оценке безопасности только растет. С помощью марковской модели объекта возможно произвести количественный анализ безопасности и определить вероятности отказа системы.

2. Предложено использовать марковскую модель при анализе риска по параметрам напряженно-деформированного трубопровода с учетом реальной поврежденности и эксплуатационной нагруженности. Для расчета переходных вероятностей марковской модели применена нормированная функция Лапласа (интеграл вероятности) по критериям статической прочности, трещиностойкости, усталости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Венгринович, В. Л.** Научный анализ и оценка рисков в системах безопасности / В. Л. Венгринович // Наука и инновации. – 2013. – № 6 (124). – С. 6–9.
2. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 т.: пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. – Москва Мир, 1990.
3. **Махутов, Н. А.** Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. Ч. 1: Критерии прочности и ресурса / Н. А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 494 с.
4. Мониторинг технического состояния и оценка остаточного ресурса больших сооружений / В. Л. Венгринович [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 42–46.