

К. А. Бебешев¹, А. В. Врагов², Е. В. Врагова³

¹ Новосибирский филиал Государственной академии профессиональной подготовки и повышения квалификации руководящих работников и специалистов инвестиционной сферы
Комсомольский пр., 4, Новосибирск, 630004, Россия

² Филиал Государственного научно-исследовательского института системного анализа
Счетной палаты Российской Федерации в Сибирском Федеральном округе
Красный пр., 42, Новосибирск, 630099, Россия

³ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
ул. Советская, 18, Новосибирск, 630099, Россия
E-mail: courses@nsunet.ru; vragova@post.nsu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИИ ТРУБОПРОВОДОВ

В работе рассматривается построение модели динамики развития аварийной ситуации на трубопроводе по причине коррозии. Рассматривается стенка трубы как некоторый объект, под действием внешней среды подвергающийся непрерывному изменению свойств от момента его ввода в процесс до момента вывода из производственного процесса по причине аварийной ситуации. Стенка трубы – часть достаточно большого объекта – трубы, которая, в свою очередь, является частью трубопроводной системы.

Ключевые слова: моделирование, аварии, трубопроводный транспорт.

Рассмотрим методику прогноза аварийной ситуации, возникающей на объекте в результате процессов деградации стенок трубы вследствие их взаимодействия с внешней средой. Наиболее часто моделирование реальных явлений природы осуществляют по трем методологическим направлениям [1]:

- 1) аппроксимационные модели, которые строятся из условия максимальной близости результатов работы модели и оригинала в смысле заранее заданного критерия;
- 2) модели структурного соответствия, которые отражают соответствие оригиналу в рамках отображения структурных особенностей изменения выходных сигналов и состояния;
- 3) феноменологические модели, которые по исходным предпосылкам декларируют сущность явления, не претендуя на его точное воспроизведение.

В отличие от первых двух подходов феноменологические модели, несмотря на их низкую прогнозную способность, дают возможность анализировать феномен явления во всем его многообразии, включая «запредельные» состояния и возможные аномальные явления в поведении анализируемого процесса. Нам представляется, что класс феноменологических моделей дает возможность вскрывать неявные, слабо изученные явления, которые декларируются как наблюдаемые, но не формализованные. Этот класс моделей может генерировать ситуации, которые, наравне с ранее известными, не наблюдались и не анализировались, как в практических, так и в теоретических исследованиях. Феноменологические модели должны быть просты в своей исходной постановке, понятны по сути принятых ограничений, давая описание существа проблемы, без описания побочных, второстепенных эффектов, изучение которых можно отнести на последующие шаги исследования.

Таким образом, в настоящем разделе будет сформулирована феноменологическая модель динамики развития питтинговой коррозии трубы как одного из важнейших факторов аварии на трубопроводе. Эта модель, по нашему мнению, может быть основой для прогнозирования аварийной ситуации на трубопроводе и стать основой алгоритма автоматизированного мониторинга состояния труб в системе автоматизированной диспетчеризации трубопроводного транспорта.

Исследования, проведенные академией коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова, свидетельствуют, что основными причинами многочисленных коррозионных разрушений

подземных трубопроводов являются: недооценка важности борьбы с коррозией, восприятие коррозионных потерь как неизбежных, а также пренебрежение основными принципами противокоррозионной защиты при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных металлических сооружений [2]. Многолетний опыт эксплуатации тепловых сетей различных конструкций свидетельствует: их долговечность обусловлена коррозионной стойкостью теплопроводов и, прежде всего, наружной коррозией. Лишь 25–30 % поврежденных труб являются результатом внутренней коррозии. Исследование механизма наружной коррозии труб, а также опыт их эксплуатации показали, что в большинстве случаев ржавчине подвержены подающие трубопроводы, работающие в опасном температурном режиме свыше 70 % времени в течение года и объясняется неблагоприятными условиями эксплуатации и слабыми защитными свойствами изоляционных конструкций [3]. Объясняется это следующим образом. Несмотря на защиту труб красками, битумами, теплоизоляцией, причины для внешней коррозии всегда найдутся. Так, при сварке стальных труб сварочный шов всегда имеет определенное количество микротрещин. Крупные трещины обнаруживаются в процессе опрессовки труб и повторно обвариваются. В процессе эксплуатации трубы подвергаются различным механическим воздействиям (тепловое расширение, сжатие, вибрации, прогиб и т. д.), которые также образуют микротрещины. Микротрещины в процессе эксплуатации трубопроводов имеют тенденцию развиваться, объединяться между собой и образовывать сквозные каналы от внутренней к внешней поверхности трубы.

Такие микротверстия называют также микросвищами. Через образовавшиеся микротрещины во внешнюю среду непрерывно выводится некоторое количество горячей воды, которая далее должна поглощаться землей либо атмосферой. Но наличие теплоизоляции затрудняет процесс высыхания трубы. Поэтому в районе микросвищей стенка трубы оказывается во влажной кислородсодержащей среде и корродирует особенно эффективно под действием наведенных в образовавшемся электролите интенсивном поле блуждающих токов, образующихся вследствие нахождения трубопроводов в соседстве с электрифицированными путями, подземными трубопроводами различного назначения, высоковольтными кабелями, наземными линиями электропередач.

При подземной закладке труб без защитного бетонного короба слой тепло- и гидроизоляции рано или поздно прорывается чем угодно: сдвигами почвы, корнями деревьев, химическими ингредиентами почвы. Грунтовая влага со всеми солями и кислотами по щелям, по прорывам проникает в материал теплозащиты и образует электролитическую ванну, в которой металл корродирует в районе щелей и неплотностей окраски, а также в районе микросвищей. В этих местах из-за отсутствия равномерного омывания стенки трубы потоком жидкости образуются глубокие раковины, рано или поздно локально разъедающие стенку трубы на всю ее толщину. Появляется точечный локальный прорыв трубы, который обнаруживается не сразу. Однако через этот прорыв начинается утечка теплоносителя вначале незначительная, но со временем все более увеличивающаяся. Уходящая горячая вода ускоряет разрушение защиты и самой трубы вокруг этого места вплоть до аварийного прорыва.

Внутренняя коррозия стенки трубы в основном определяется качеством водоподготовки в котельной или на ТЭЦ, в том числе наличием в воде ионов хлора. На крупных электростанциях вода проходит через специальный цех водоподготовки, в котором она очищается от всякого рода вредных ионов и дегазируется. В малых котельных, которыми избилуют городки и поселки водоподготовки нет в принципе. Вода идет – сетевая – со всеми возможными естественными примесями, включая ионы хлора и кислород. При внутренней коррозии основным процессом является равномерное утоньшение трубы изнутри за счет переноса частиц металла потоком воды. В транспортных трубопроводах, где ионы хлора не устранены, развивается щелевая коррозия. Ионы хлора циркулируют в щели, вынося ближе к потоку ионы металла, превращая щель в сквозные отверстия. Щели в системах имеются около любого резьбового соединения, щелями являются микротрещины в окрестности сварки. Процесс ускоряется в период смены режима отопления. Даже час пребывания трубы без воды в кислородсодержащей атмосфере приводит к серьезному ржавлению внутренней поверхности труб. Поток смываемой со стенок ржавчины регулярно наблюдается после включения горячего отопления. Микрочастицы ржавчины накапливаются в окрестностях вентилях, тройников, колен, в узостях, забивая проходы. В этой пористой среде накапливаются растворенные в воде неф-

тепродукты, с концентрацией не менее 5 микрограмм на литр, которые образуются из-за вымывания элементов смазки подвижных деталей насосов, вентилях. Неравномерность коррозионного разрушения поверхностей металлов в различных точках при одинаковых внешних условиях обусловлена неоднородностью физико-химических свойств реальных металлов и сплавов, проявляющаяся в их электрохимической гетерогенности. По данным работы [4], электрохимическая гетерогенность поверхности металла может быть вызвана микронеоднородностью структуры металла, например, различием в составе или ориентации отдельных кристаллов, наличием границ зерен и инородных включений, субмикронеоднородностью металла (местные несовершенства кристаллической решетки вследствие дислокаций или включения других атомов в решетку основного металла). Практика свидетельствует, что, несмотря на значительные усилия и затраты на организацию водоподготовки и водно-химического режима, с течением времени проявляют себя процессы структурной коррозии, которые приводят к повреждениям трубных конструкций задолго до исчерпания проектного ресурса. При этом, как свидетельствует Р. М. Маннапов, на поверхностях трубы и в объеме металла могут возникать различные виды повреждений и дефектов: коррозионные поражения разного характера – от сплошной равномерной коррозии до локальной (питтинговой, язвенной, межкристаллитной); трещины различной природы возникновения, эрозионный износ, нарушения сплошности металла вследствие ползучести и других причин. Распределение повреждений по поверхности оборудования обусловлено детерминированными причинами, а также стохастическими свойствами процессов разрушения, закономерности которых почти не изучены.

Поэтому, если важно определение не только величины общего коррозионного эффекта, но и расчет распределения коррозионного поражения по поверхности, то единственно правильным считается [5] рассмотрение процесса коррозии с учетом гетерогенно-электрохимического механизма, при этом необходимо применение вероятностно-статистических методов.

Неравномерность разрушения поверхности трубы характеризуется функцией распределения глубин разрушения $F(h)$ (см. рис. 1). Числовое значение этой функции определяет долю поверхности, имеющей глубину разрушения меньше, чем h . С целью выявления вида функции $F(h)$ проводили специальные исследования на образцах различных марок сталей в нескольких коррозионных средах. По результатам испытаний построены эмпирические функции распределения $F(h)$, приведенные в различных источниках [6; 7].

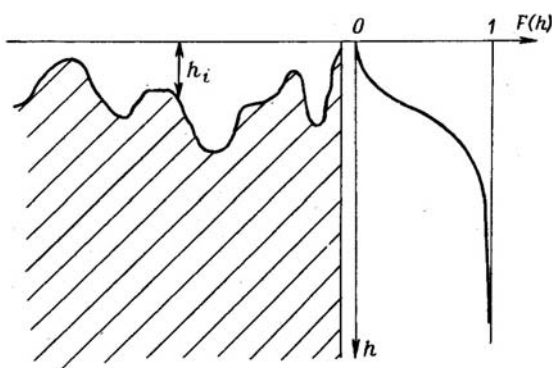


Рис. 1. Схема сечения поверхности, подвергшейся разрушению, и функция распределения $F(h)$ глубин разрушения

В работе В. Н. Волченко [8] показано, что функция распределения измеренных коррозионных дефектов в металлах средствами неразрушающего контроля хорошо описывается распределением Вейбулла:

$$F(h) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^b\right), \quad (1)$$

где a – параметр масштаба распределения; b – параметр формы, характеризующий разброс значений h . Здесь же показано, что значения параметров функции распределения (1) зависят от степени неравномерности (т. е. вида) разрушения поверхности и от метода измерений глубин разрушений, но не зависят от площади поверхности, подвергшейся разрушению. Вели-

чина же максимальной глубины разрушения зависит от размеров поверхности. Факторы, определяющие степень коррозионного поражения трубы, условно делят на конструктивные (детерминированные) и технологические (стохастические).

К детерминированным факторам относят различные условия нагружения разных участков поверхностей транспортного оборудования: различие температур, давления, скоростей и концентраций технологических сред, содержание в них абразивных частиц, степени аэрации теплоносителя, механических напряжений и деформаций, а также наличие невыявленного при контроле брака изготовления или ремонта.

Стохастическими факторами неравномерности разрушения различных участков поверхности, находящихся в одинаковых условиях нагружения, являются неизбежные для данного

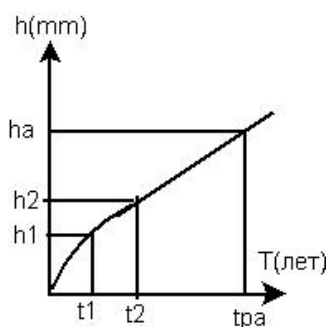


Рис. 2. Схема прогнозирования времени до аварии: t_1 , t_2 – моменты времени контроля процесса ржавления; h_1 , h_2 – глубина повреждения в моменты времени t_1 , t_2 ; h_a – предельная глубина дефекта, при которой возможна аварийная утечка воды; t_{pa} – прогнозируемое время до аварии

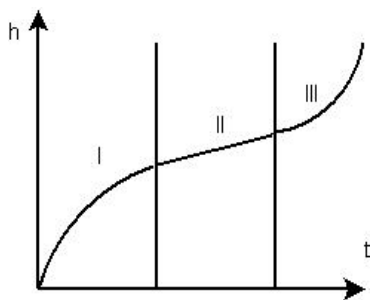


Рис. 3. Типичная зависимость глубины повреждения $h(t)$ от продолжительности эксплуатации: I – начальный этап; II – период стабильной интенсивности коррождения, III – заключительный этап, характеризующийся повышенной интенсивностью разрушения

уровня технологии изготовления структурная и химическая неоднородность металла трубы и сварных соединений (наличие в металле различных структурных фаз, неметаллических включений, пор, ликвации и др.), отклонение геометрических размеров в элементах оборудования и сварных швов (в пределах допусков) и связанное с этим различие в них деформаций и напряжений, случайные колебания распределения технологических потоков по поверхности оборудования. Поэтому прогнозирование времени работы оборудования «до отказа» обычно осуществляется по схеме, приведенной на рис. 2. Через определенные периоды эксплуатации t_1 , t_2 и т. д. измеряют максимальные величины возникших повреждений (износа, коррозии, деформаций) h_1 , h_2 и т. д. и экстраполируют зависимость до предельно допустимой величины повреждений h_n . Такой метод позволяет получить достаточно точные оценки показателей надежности, если известен вид зависимости $h(t)$ и при измерениях значений h определяются действительно максимальные значения повреждений, т. е. осуществляется сплошной контроль поверхностей оборудования.

Вид зависимости $h(t)$ для многих видов разрушения приводится в литературе. При некоторых видах коррозии и изнашивания (трение, эрозийное) зависимость износа от времени линейная: $h(t) = h_0 + ct$, где h_0 , ct – постоянные величины для заданных условий транспорта теплоносителя. Некоторые другие виды зависимостей $h(t)$ (линейная, степенная, логарифмическая, экспоненциальная) и условия, при которых они наиболее вероятны, рассмотрены в обзоре [9].

Типичный вид динамики функции $h(t)$ представлен на рис. 3. В течение срока эксплуатации оборудования можно выделить три характерных периода. В первый переходный период (I), называемый также периодом приработки, интенсивный рост h постепенно замедляется и наступает второй период (II) стабильной интенсивности разрушения с почти постоянной скоростью. В третьем периоде (III) по мере накопления повреждений и возрастания механических напряжений скорость разрушения начинает увеличиваться и возрастает вплоть до полного разрушения аппарата или его элемента (поломки, потери устойчивости, сквозного разрушения). Продолжительность периодов I, II, III может быть различной при разных видах режимов работы трубопроводного транспорта, вида разрушения и условий эксплуатации, в том числе для внешней либо внутренней сторо-

ны стенки трубы. Так, при сплошной коррозии первый период слабо выражен, при ударно-абразивной эрозии износ в первоначальный период отсутствует (имеется так называемый инкубационный период). При высоких напряжениях растяжения в элементах конструкции второго периода может не быть. Третий период может отсутствовать в случае эксплуатации оборудования при умеренных нагрузках и снятия его с эксплуатации до возникновения предельно допустимых величин повреждений. Обычно прогнозирование времени до аварии осуществляют в области первого и второго периода с применением математической модели зависимости $h(t)$, ссылки на которые сделаны нами ранее. Как свидетельствует В. В. Болотин, на практике при оценке надежности оборудования чаще всего применяется линейная модель $h(t)$. Так как все рассмотренные модели при локальной коррозии являются выпуклыми, то использование линейной модели при оценке надежности в этом случае дает оценку с некоторым запасом, что может приводить к преждевременным остановкам на ремонт или списанию оборудования [10].

Применим рассмотренные выше положения для построения модели динамики развития аварийной ситуации на трубопроводе по причине коррозии. Рассмотрим стенку трубы как некоторый объект, под действием внешней среды подвергающийся непрерывному изменению свойств от момента его ввода в процесс до момента вывода из производственного процесса по причине аварийной ситуации. При анализе будем помнить, что стенка трубы рассматривается как часть достаточно большого объекта – трубы, которая, в свою очередь, является частью трубопроводной системы, осуществляющей подачу тепла потребителю.

Итак, объект исследования настоящего раздела работы – стенка трубы изготовленной из сталей достаточно обширной номенклатуры¹. В соответствии с проектом трубопроводной системы каждая труба имеет свои геометрические характеристики: длину, диаметр и толщину стенки, а в зависимости от технологии изготовления – уникальный химический состав стали, микроструктуру, чистоту по традиционным неметаллическим включениям², некоторым механическим характеристикам, которые указаны в технических условиях. Для определенности трубой назовем фрагмент трубопроводной системы, выполненный из однородного материала «от задвижки до задвижки» или «от задвижки до вставки», выполненной из материала с отличающимися характеристиками (врезка в трубу отремонтированного участка). В процессе эксплуатации стенка трубы взаимодействует с внешней средой, находящейся как внутри трубы (теплоноситель) так и снаружи (влага). Состав внешней среды и режимы взаимодействия для каждого элементарного участка могут существенно различаться. Таким образом, в процессе функционирования труба корродирует с обеих сторон, что приводит ее к свищевым дефектам и аварии. Предотвращение аварии считается одной из основных задач служб эксплуатации. Вторым аварийным событием, происходящем в трубе, считается коррозионное зарастание сечения, которое, в конечном счете, оказывает существенное влияние на режимы транспорта теплоносителя, тем самым на изменение условий транспортирования и, следовательно, на развитие аварий первого типа.

Будем считать, что процессы равномерной коррозии для трубы с одинаковыми свойствами происходят одновременно и с одинаковой скоростью по всей поверхности, а процессы питтинговой коррозии в основном определяются структурой и качеством металла. Однако процессы эти естественным образом взаимодействуют и «накладываются друг на друга» с суммарным деградирующим воздействием, превышающим результаты каждого отдельно взятого процесса. Уникальность микроструктуры материала и относительно нестабильный процесс транспортировки теплоносителя определяют уникальную траекторию физико-химической реакции корродирования. Следовательно, проявление аварийного дефекта трубы возможно в любом месте, имеющем к тому же незначительную площадь. Этот участок трубы будем называть элементарным. Однако множество элементарных участков трубы в общем случае составляют полную поверхность цилиндра, образуемого стенкой трубы, т. е. аварий-

¹ На территории России для трубопроводов тепловых сетей действуют «Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды Госгортехнадзора России». Согласно этим Правилам для трубопроводов тепловых сетей III и IV категории разрешается использовать прямошовные и спиральношовные трубы из сталей ст3сп5, 10, 20, 17ГС, 17Г1С, 17Г1СУ. Новые технические условия ТУ 14-ЗР-69-2003 и ТУ 14-ЗР-70-2003 представляют собой обобщенные требования для труб из четырех марок сталей ст3сп5, 20, 17Г1С, 17Г1СУ.

² Оценивается по ГОСТу 1778.

ные коррозионные процессы следует рассматривать как множество элементарных процессов по отношению к элементарным участкам трубы $S(s_{s1}, s_{s2}, \dots, s_{sk}, \dots, s)$, $S = \sum_{i=1} s_{si}$ на площади развертки цилиндра $S = 2\pi RL$, где R и L – радиус и диаметр трубы соответственно.

Будем считать, что труба находится в аварийном состоянии, если на некотором элементарном участке трубы образовался свищ либо прорыв стенки. Эвристическое правило идентификации аварийной ситуации на этой площади известно:

$$A_j = \frac{1, \text{ если «свищ»}}{0 \text{ иначе}} \quad 1 \dots j \dots, \quad (2)$$

где j – номер элементарного участка, на котором произошел прорыв трубы.

Однако в распоряжении эксплуатационных служб нет инженерных способов оперативной идентификации этого события даже в условиях развиваемых автоматизированных систем контроля и диспетчеризации тепло- и водоснабжения типа «Генерального плана», реализованного в Советском районе г. Новосибирска. Как возможное направление развития автоматизированной системы предупреждения аварийных ситуаций в настоящей работе рассматривается:

- разработка модели классификации состояний СТС, позволяющей на основе методов численной таксономии определять потенциальный техногенный и экологический ущерб аварии;
- разработка механизма прогнозирования состояний СТС, который на основе метода имитационного моделирования позволяет планировать меры предотвращения аварий;
- разработка на основе модели прогноза аварий СТС алгоритма функционирования системы предотвращения аварий СТС и включение ее в функционирующую автоматизированную систему «Дежурный генеральный план», с целью снижения времени идентификации аварийного состояния и принятия адекватных мер по их предотвращению.

Рассмотрим результаты работ, проведенных в данном направлении. На основании ранее выявленных нами свойств исследуемой системы, а именно множественности и динамичности элементарных коррозионных процессов, обремененных прямыми и обратными связями, их взаимосвязь и взаимозависимость, определяющих существенную нелинейность, для описания механизмов формирования аварийных событий (АС) применим основные результаты активно развиваемой в настоящее время теории катастроф [11], которая, по мнению доктора физико-математических наук А. И. Чуличкова, «не требует подробных математических моделей и может описывать ситуации не «количественно», а «качественно», а ее результаты и выводы иллюстрируются простыми геометрическими образами [12]. Представим процесс достижения АС для элементарного участка трубопровода рисунком. Процесс достижения устойчивого состояния (события A), называемого «узел» [13], осуществляется практически из любого состояния системы «стенка – теплоноситель» (СТС).

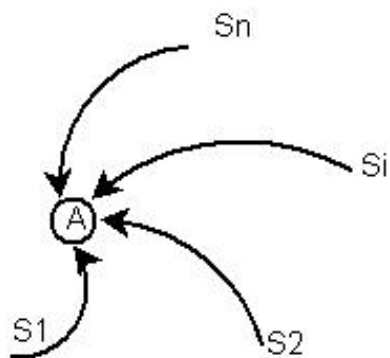


Рис. 4. Фазовый портрет в окрестности события A

При этом, как мы выяснили ранее, множество состояний СТС, каждое из которых в свою очередь является бифуркационными. Это свойство следует из модели Э. Лоренца [14], согласно которой процесс из некоторой точки S может продолжаться по различным направлениям, определяемым моментным состоянием активной среды. Переход процесса в некоторое другое состояние неизбежно изменяет среду, что вызывает очередную бифуркацию и т. д. Другими словами в сплошных средах изменение одних структур изменяет окружающую среду (элементы сами являются частью среды), поэтому бифуркации представляют собой совместный процесс трансформации объекта вместе с окружением. Следовательно, развитие коррозионных процессов можно представить как последовательность изменения состояния трубы и теплоносителя между моментами бифуркаций этой системы (рис. 5), усредненную на достаточно длитель-

ном временном интервале наблюдения. Поэтому траектория движения СВС к аварийному событию можно представить некоторой кривой, как это показано на рис. 4.

Исследуем с помощью этих моделей возможность прогноза некоторой будущей ситуации. Пусть известно состояние СТС в координате $S(\bar{P})$, где \bar{P} – вектор параметров, определяющий координату события (см. рис. 6). Как следует из рисунка, различие между прогнозом события и фактическим его проявлением определяется:

- во-первых, координатами исходного события, т. е. набором параметров, его определяющих;
- во-вторых, в силу бифуркаций траектория достижения фактического состояния СТС в следующий момент его идентификации будет отличаться на некоторую, может быть, весьма значительную (или незначительную) величину, которая свидетельствует о точности прогнозной методики и горизонте прогноза.

Однако величина расхождения между точным и фактическим состоянием СТС определяется не только методом прогноза, а, прежде всего, изменениями в системе СТС, когда, как показано Г. Г. Малинецким и С. П. Курдюмовым, «две близкие в начале процесса траектории расходятся. Скорость расходимости определяется так называемым ляпуновским показателем, и от этой величины зависит интервал времени, на который может быть дан прогноз. Можно сказать, что для каждой системы есть свой горизонт прогноза» [14]. Из данного утверждения может быть сделан важный вывод: для повышения точности оценки координат состояния СТС необходимо искусственно уменьшить горизонт прогноза.

Это требование может быть реализовано разбиением бифуркационной траектории на несколько последовательных участков (стадий), которые для определенности назовем следующим образом.

- S_1 – нормальное состояние СТС в момент времени $t+t_j$ (далее на схемах – норма). Для этой стадии выполняется условие $\bar{X}_1(t+t_j) \geq \bar{X}^1$, где t – начало бифуркационной траектории; t_j – длительность интервала «нормального состояния» от начала процесса до момента перехода системы в удовлетворительное состояние; $\bar{X}_1(t+t_j)$ – фактическое состояние трубопроводного транспорта, выраженное через вектор характеристик непосредственно конкретной трубы и среды, определяющей ее функционирование; \bar{X}^1 – вектор физических характеристик нормативного состояния трубопроводного транспорта.
- S_2 – удовлетворительное (далее на схемах – среднее): $\bar{X}^2 < \bar{X}_2(t+t_k) \leq \bar{X}^1$, здесь $\bar{X}_2(t+t_k)$ – фактическое состояние трубопроводного транспорта, выраженное через вектор характеристик непосредственно конкретной трубы и среды, определяющей ее функционирование; t_k – длительность интервала «удовлетворительного состояния» от начала процесса до момента перехода системы в критическое состояние; \bar{X}^2 – вектор физических характеристик критического состояния трубопроводного транспорта.

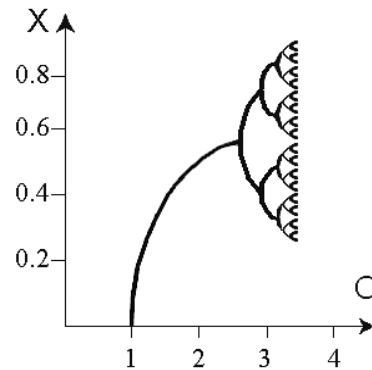


Рис. 5. Формирование траектории развития бифуркационного процесса (иллюстрация [15])

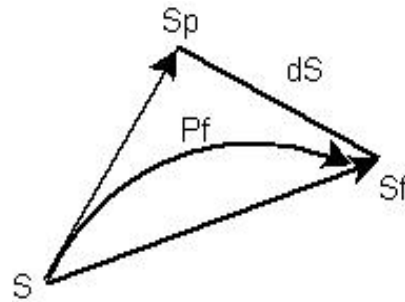


Рис. 6. Соотношение прогнозных оценок и фактического развития событий СТС: S_p , S_f – прогнозное и фактическое развитие событий; P_f – фактическая траектория СТС; dS – погрешность (риск) прогноза

- S_3 – критическое (предаварийное): $\bar{X}^3 < \bar{X}_3(t+t_n) \leq \bar{X}^2$, здесь $\bar{X}_3(t+t_n)$ – фактическое состояние трубопроводного транспорта, выраженное через вектор характеристик непосредственно конкретной трубы и среды, определяющей ее функционирование; t_n – длительность интервала «критического состояния» от начала процесса до момента перехода системы в аварийное состояние; \bar{X}^3 – вектор физических характеристик критического состояния трубопроводного транспорта.
- S_4 – авария: $\bar{X}_4(t+t_f) \leq \bar{X}^4$, здесь $\bar{X}_4(t+t_f)$ – фактическое состояние трубопроводного транспорта, выраженное через вектор характеристик непосредственно конкретной трубы и среды, определяющей ее функционирование, или в результате экспертного оценивания, например, по выражению (2); t_f – момент проявления аварийного состояния системы; \bar{X}^4 – вектор физических характеристик аварийного состояния трубопроводного транспорта.

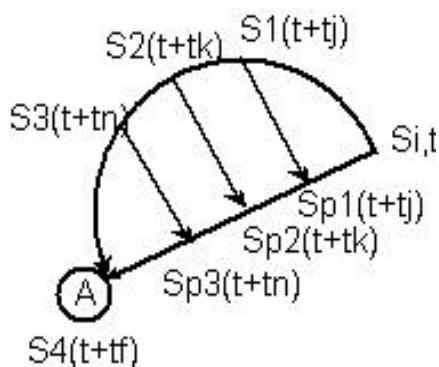


Рис. 7. Прогноз как последовательность событий

Исходя из рис. 6, 7 определим прогноз аварийного события как оценку длительности интервалов ($t_j + t_k + t_n$) до момента t_f проявления события «авария», т. е. каждый прогноз t_f будет определяться как сумма интервалов нахождения СТС в трех предыдущих стадиях процесса. Однако проблема состоит в том, что в силу модели Э. Лоренца бифуркационные траектории происходящих в СТС процессов динамично изменяются, следовательно, состояния $S_j(t_n)$ в каждый момент времени не могут быть установлены однозначно, можно говорить лишь о некоторой вероятности аварийного события как обобщения прогнозов поведения СТС за некоторый период мониторинга СТРТ. Для

оценки обобщенной вероятности проявления определенных выше событий и предназначена предлагаемая модель (рис. 8).

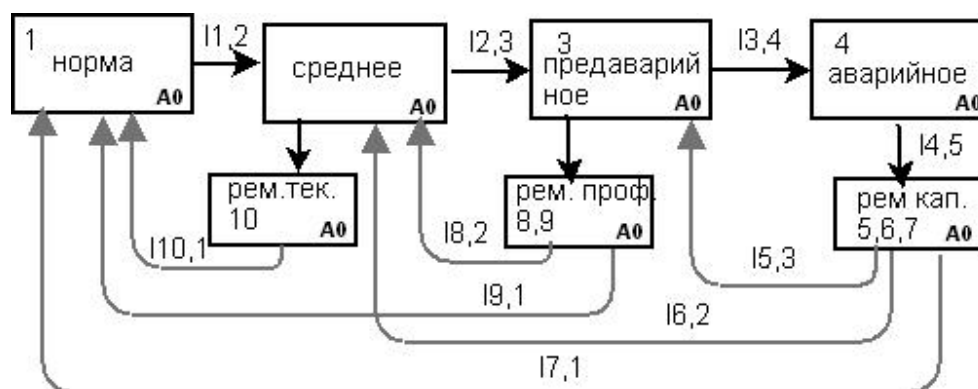


Рис. 8. Модель функционирования СТС в соответствии с бифуркационной траекторией, показанной на рис. 7.

Введем в модель состояния СТС превентивные управленческие воздействия, определяющие текущий 10, профилактический 8 ремонт и эксплуатационное обслуживание 9, а также капитальный ремонт различной степени сложности 5, 6, 7. Будем считать, что в зависимости от качества и объема ремонтных работ СТС переходит в состояния S_1 или S_2 , как это показано на рис. 9: пусть СТС в период t_1, t_2 перешла в $S_i(t_2)$, для которого назначен некоторый ремонт $R(2)$ в соответствии с рис. 8.

В результате превентивных управленческих воздействий (ремонтов различного уровня) СТС переходит в состояние $S_j(t_3)$, из которого в дальнейшем возобновляет траекторию достижения аварийной ситуации.

Аналогичным образом изменяются координаты события $S_j(t_n)$, определяющие каждый раз начало новой траектории движения СТС к аварийной ситуации, если событие $S_j(t_n)$ является следствием изменения режимов транспорта теплоносителя и соответственно условий, вызывающих ржавление стенки трубы. Наиболее типичными примерами изменения режима можно назвать гидравлические испытания трубопровода, летнюю подачу теплоносителя, режимы заполнения трубопровода теплоносителем и т. д. Заметим также, что прекращение или изменение любого из названных выше режимов приводит к формированию нового события $S_j(t_n)$.

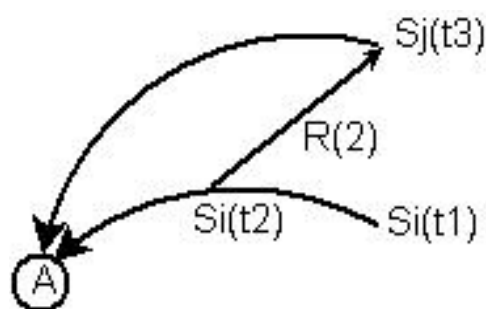


Рис. 9. Изменение бифуркационной траектории вследствие превентивного ремонта

Кроме того, при анализе механизма коррозионной деградации труб было установлено, что питтинговая коррозия стенки трубы происходит и с внешней ее поверхности (под теплоизоляцией). Описанная выше бифуркационная модель аварийного события для системы «стенка – внешняя среда» будет подобна описанной и отличается лишь интенсивностью процессов коррозии и местом ее возникновения. И в этом случае необходимо констатировать, что современные, доступные службам ЖКХ, технические средства непрерывного выявления аварии отсутствуют, что затрудняет применение описываемой задачи мониторинга в этом приложении.

Таким образом, разработанная модель множественных преобразований бифуркационных траекторий состояний СТС объясняет отсутствие реальной возможности точного прогноза аварии на длительном временном интервале функционирования СТС, а также необходимость изменения концепции «прямого прогноза события» на модель оценки принадлежности события $S_j(t_n)$ некоторому выделенному ранее участку траектории согласно рис. 8. При этом становится очевидным, что назначение последовательных стадий движения СТС к аварийной ситуации может быть различным, а их число, соответственно, сколь угодно большим. Проблема состоит в оперативной идентификации стадии в момент t , например, средствами автоматизированного мониторинга состояния трубопровода. Вторая проблема заключается в необходимости принятия управленческого решения на каждой идентифицированной стадии функционирования трубопроводной системы. Так как количество и содержание управленческих сценариев по предотвращению аварий ограничено и невелико³, то и число идентифицируемых стадий увеличивать не целесообразно.

Возвращаясь к описанию модели, представленной рис. 8, рассмотрим смысл обозначений переходов между определенными выше событиями. В общем случае запись I/J означает: I – интенсивность перехода из состояния J в состояние I (например, $I/2$ означает интенсивность перехода из состояния I в состояние 2) и рассчитывается как отношение событий перехода ко времени наблюдения. Однако выше было указано на некорректность использования статистических данных, относящихся к различным условиям их генерации. С другой стороны, в силу приведенных выше особенностей бифуркационного описания траектории достижения аварийной ситуации в модели не могут быть учтены вероятностные характеристики того или иного события или его принадлежности к зафиксированной стадии процесса. Поэтому исследование построенной модели не может быть осуществлено на основе теории массового обслуживания либо марковских процессов.

Построим алгебру случайных событий, описывающих наступление аварийной ситуации. Пусть участок трубопровода состоит из элементарных участков, на каждом из которых возможно наступление аварийной ситуации с некоторой вероятностью, т. е. элементарным со-

³ Возможными вариантами управления, предотвращающего аварии, могут быть:

- на стадии «норма» – регулирование и оптимизация режимов распределения тепла потребителям;
- на стадии «среднее» – снижение технологических параметров в трубопроводном фрагменте;
- на стадии «предаварийное» – замена части трубопровода, оборудования;
- при событии «авария» – капитальный ремонт фрагмента сети.

бытием является наступление аварийной ситуации на элементарном участке w_i , а его вероятность $p_i = P(w_i)$. Можно считать, что возникновение аварийной ситуации на любых двух элементарных участках является независимым событием. А событие, заключающееся в наступлении аварийной ситуации на протяженном участке трубопровода, будет являться объединением соответствующих элементарных событий $W = \bigcup_{i=1}^N w_i$, так как возникновение аварийной ситуации хотя бы на одном участке трубопровода означает возникновение аварийной ситуации на всем трубопроводе. Тогда вероятность этого сложного события можно рассчитать следующим образом:

1) вероятность нормальной (неаварийной) работы элементарного участка равна:

$$P(\overline{w_i}) = 1 - P(w_i) = 1 - p_i;$$

2) событие \overline{W} , заключающееся в нормальной (безаварийной) работе протяженного участка трубопровода, является произведением (пересечением) независимых событий, заключающихся в нормальной работе элементарных участков – $\overline{w_i}$, $i = \overline{1, N}$;

3) в соответствии с утверждениями (1) и (2) вероятность нормальной работы протяженного участка равна

$$P(\overline{W}) = \prod_{i=1}^N P(\overline{w_i}) = \prod_{i=1}^N (1 - p_i); \quad (3)$$

4) следовательно, вероятность возникновения аварийной ситуации на протяженном участке равна

$$P(W) = 1 - P(\overline{W}) = 1 - \prod_{i=1}^N p_i. \quad (4)$$

Особенностью описанного подхода к идентификации события «авария» является «масштабируемость» результата в том плане, что понятиям «элементарный участок» и «протяженный участок» можно придавать различный физический смысл. Например, отрезок трубы как отдельное изделие можно считать протяженным участком, состоящим из последовательно расположенных кольцевых сегментов – элементарных участков. Или считать отрезок трубы элементарным участком, а ветку трубопровода, состоящую из таких отрезков, – протяженным участком. И даже принять за элементарный участок целую ветку трубопровода, а за протяженный несколько таких веток последовательно соединенных. Для всех этих примеров из формул приведенных выше следует, что с увеличением числа элементарных участков (на каждом из них не нулевая вероятность возникновения аварии), из которых состоит протяженный участок трубопровода, вероятность аварии трубопровода в целом возрастает.

Если рассматривать отдельную трубу как состоящую из набора последовательно соединенных кольцевых сегментов, то вероятность аварии на длинной трубе выше, чем на короткой, при прочих совпадающих условиях.

Прологарифмировав (3) можно получить выражение:

$$\ln P(\overline{W}) = \sum_{i=1}^N \ln P(\overline{w_i}), \quad (5)$$

В соответствии с (5) можно утверждать, что логарифм вероятности нормальной работы трубопровода, состоящего из последовательно расположенных участков (труб), функция аддитивная по отношению к соответствующей характеристике своих составных частей. Поскольку вероятность безотказной работы $P(\overline{w_i}) < 1$, то логарифм этой величины $\ln P(\overline{w_i}) < 0$ и добавление к трубопроводу еще одного участка уменьшает соответствующую характеристику и тем самым уменьшает вероятность безотказной работы трубопровода в целом.

Аналогичные рассуждения можно провести для отдельной трубы, рассматривая ее как систему, состоящую из последовательно расположенных кольцевых сегментов. Результатом будет вывод о том, что вероятность безотказной эксплуатации трубы будет тем ниже, чем больше длина трубы, т. е. чем из большего числа элементарных кольцевых сегментов она состоит. При неограниченном росте числа сегментов (длины трубы) вероятность безотказной эксплуатации имеет вид, показанный на рис. 10.

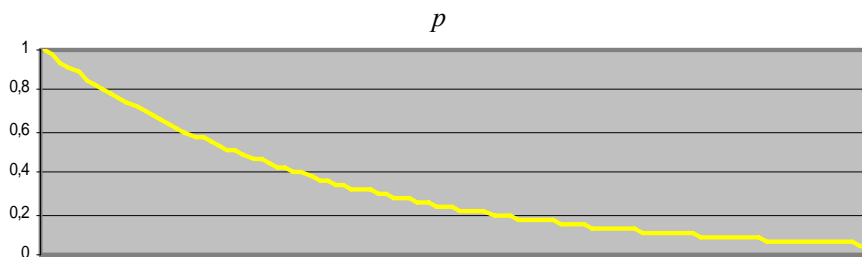


Рис. 10. Зависимость вероятности безотказной работы от числа сегментов трубопровода

Рассмотрим, чем определяется вероятность наступления аварийного события на элементарном участке трубопровода. Будем принимать во внимание два фактора:

- 1) процессы «естественного» ухудшения состояния трубы в процессе эксплуатации, зависящие от времени, химического состава теплоагента, качества трубы и т. д.;
- 2) нагрузки, зависящие от режима эксплуатации.

Влияние первого фактора, точнее совокупности большого числа разнообразных факторов, описать крайне сложно. Очевидно одно – в промежутках между ремонтно-восстановительными работами функция $y = f(t)$, описывающая зависимость «качества», «состояния», «способности противостоять нагрузкам» от времени, является невозрастающей. Следует даже предположить, что она убывает и, более того, способность противостоять нагрузкам в силу расширения зоны коррозии, изменения состава и механических свойств материала снижается с достаточно большим ускорением⁴, т. е. ее и первая, и вторая производные отрицательны:

$\frac{dy}{dt} < 0, \frac{d^2y}{dt^2} < 0$. График функции имеет при этом характерный вид, представленный рис. 11.

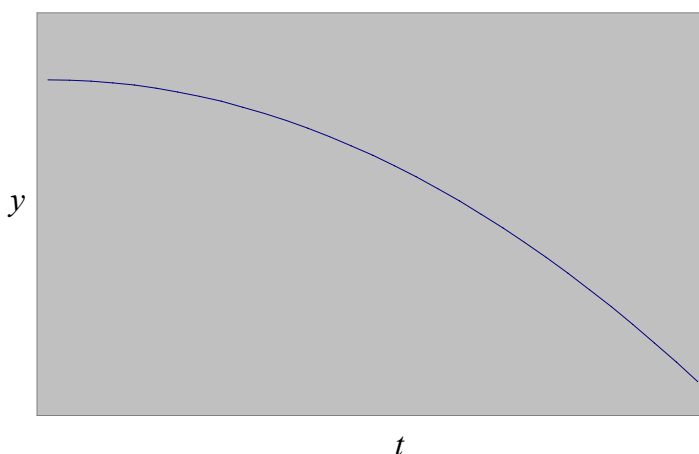


Рис. 11. Зависимость изменения состояния стенки трубы от времени

С другой стороны, аварийная ситуация возникает при определенном соотношении «состояния трубы» и действующей на нее нагрузки, а именно когда нагрузка P превышает некоторое пороговое значение, зависящее от состояния

$$z = g(y),$$

т. е. факт наличия аварии⁵ определяется условием

$$A = \begin{cases} 0, P \leq z \\ 1, P > z \end{cases} \quad (6)$$

⁴ Этот факт подтверждается результатами имитационного натурального эксперимента, выполненного на предприятиях ЦНИИчермет им. И. П. Бардина, НИФХИ им. Л. Я. Карпова ОАО «Северсталь» И. Г. Родионова, О. Н. Бакланова, В. М. Липовских, О коррозии теплотрасс: <http://www.td-trubotorg.ru/analytics/quality.htm>.

⁵ См. условие 1 в настоящей работе.

Ранее это условие было записано в субъективной интерпретации (2), которое, кстати, используется при обработке устной информации жителей о замеченных ими случаях аварии.

Эти зависимости, а также способ расчета вероятностей использован при моделировании и прогнозе поведения системы трубопроводов тепловых сетей. Для уточнения вида и параметров рассмотренных зависимостей можно воспользоваться результатами наблюдений за поведением трубопроводов в режиме штатной эксплуатации и при проведении испытаний ТС при допущении достаточно длительных временных интервалов сохранения полученных экспериментальных данных. В работах И. Г. Овчинникова, Х. А. Сабитова [17] отмечалось, что для описания динамики коррозионных процессов применяют линейные, показательные, логарифмические и экспоненциальные модели. В частности, показательные модели рекомендуется применять при описании многих видов коррозии поверхностей металлов (как сплошной, так и локальной), а также при коррозии под напряжением и изнашивании [18]. Воспользовавшись этими рекомендациями, функцию $y = f(t)$ в первом приближении будем считать показательной, т. е. предполагать, что она имеет вид $y = 1 - ka^t$ для $t > 0$, где $k > 0$ и $a > 1$.

Параметры этой функции можно принять, а в последующем уточнить по статистическим экспериментальным данным, полученным в процессе мониторинга транспортной системы.

Момент времени, когда значение функции становится равным нулю, соответствует состоянию элементарного участка трубопровода, при котором он разрушается без внешних воздействий с вероятностью равной единице. И это состояние достоверно наступит с течением времени без проведения ремонтно-профилактических работ. В соответствии со сказанным выше, разобьем шкалу состояний элементарного участка на несколько интервалов, вообще говоря, нечетких: нормальное состояние, удовлетворительное, критическое, аварийное. Тогда жизненный цикл элементарного участка трубопровода, соответствующий бифуркационной траектории, можно представить в следующем виде.

В таком виде тепловая сеть представляет собой систему с постепенной деградацией, причем локализация нарушений ведущих к деградации и их последствий случайна. Однако для целей прогноза возможности перехода события из одного состояния в другое, необходимо оценить длительности интервалов, (стадий) в которых состояния СВС не изменят область своего функционирования (см. рис. 9). На основании рис. 12 и описанных выше вероятностных соотношений, построим имитационную модель динамики СВС по выделенным стадиям.

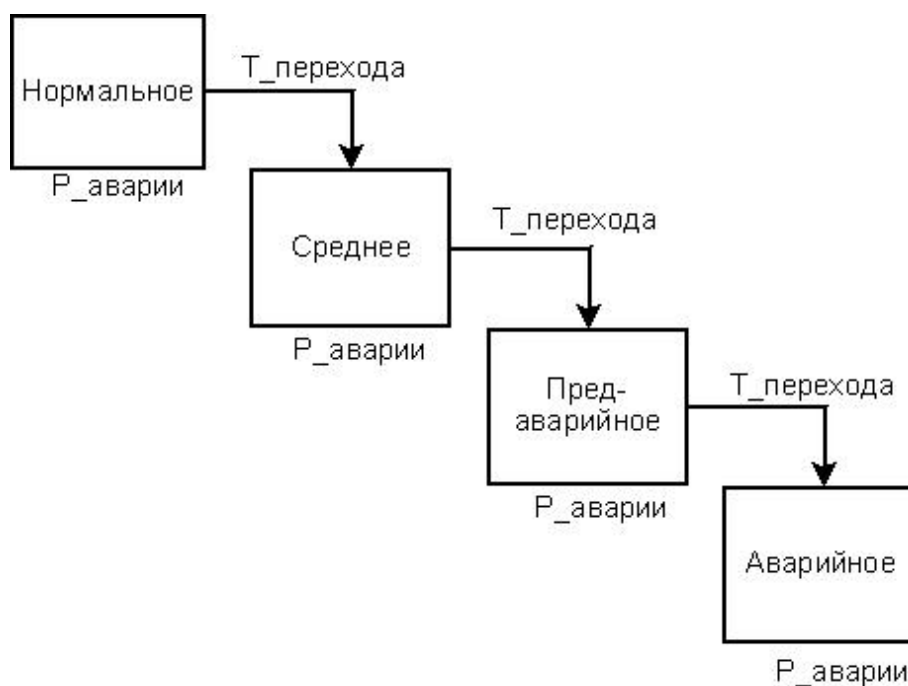


Рис. 12. Жизненный цикл фрагмента трубы с постепенной деградацией

Начальные условия для имитационного эксперимента заданы табл. 1.

Математические ожидания временных диапазонов изменения режима функционирования (месяцев в течение года) задавались следующим образом: зимний период – 5, летний – 5, гидроиспытания – 0,5, облегченный – 1,5, среднеквадратическое отклонение для первоначально выбранного интервала – 0,5. Начало имитации может осуществляться с любого временного интервала, назначаемого случайно. Далее алгоритм строит последовательность временных интервалов эксплуатации системы начиная от случайно назначенного.

Интенсивность перехода системы в связи с изменением параметров транспортирования (давление в системе, расход теплоносителя) задана табл. 2.

Таблица 1

Интенсивности перехода системы из состояния в состояние в зависимости от режима транспортирования (событий/месяц)

Режим транспортирования энергоносителя	Интенсивность от предаварийного состояния к аварии	Интенсивность от среднего к предаварийному	Интенсивность от нормального к среднему
Зимний (Z)	0,3	0,027	0,006
Летний (L)	0,116	0,016	0,003
Гидроиспытаний (G)	0,7	0,035	0,011
Облегченный (S)	0,208	0,215	0,004

Таблица 2

Интенсивность перехода СВС в сопряженные состояния при повышении / понижении параметра

	Нормальное	Среднее	Предаварийное	Авария
Нормальное	1	0,3/0,2	0	0
Среднее	0	1	0,6/0,2	0
Предаварийное	0	0	1	0,8/0
Авария	0	0	0	1

В таблице под чертой приведена интенсивность перехода системы от «худшего» к «лучшему» состоянию при понижении технологических режимов функционирования (см. рис. 9).

Аналогично задаются интенсивности перевода СТС после ремонтов различного типа, «производимых» в том или ином моделируемом режиме.

Моделирование выполнено в программной оболочке «MathCad». В результате моделирования получено соотношение длин интервалов нахождения текущего события СТС как «усредненная динамика» по всем вариантам функционирования системы. В частности, было показано, что с вероятностью 0,8 СВС из состояния «предаварийное» перейдет к состоянию «авария» за $6 \pm 1,5$ месяца, из состояния «среднее» к «предаварийному» за 20 ± 6 месяцев. Эти соотношения и были положены в алгоритм прогноза интервала «до смены состояния» в системе мониторинга. В результате моделирования получены зависимости, отражающие возможности переходов системы из одних состояний в другие с течением времени. Полученные в ходе моделирования зависимости достаточно хорошо аппроксимируются логарифмической функцией вида

$$p(t) = \begin{cases} k \ln(t), & k \ln(t) < 1 \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}$$

Качественно картины интенсивностей таких переходов показаны на рис. 13, где видно, например, что система, находящаяся в «нормальном» состоянии, может с некоторой задан-

ной вероятностью за небольшое время перейти в «среднее» состояние, за несколько большее – в «предаварийное» и за большое время – в «аварийное». Или если задать некоторое время жизни системы, то по его истечению она окажется с «маленькой» вероятностью в аварийном состоянии, с несколько большей вероятностью – в «предаварийном» и с заметно большей вероятностью – в «среднем» состоянии.

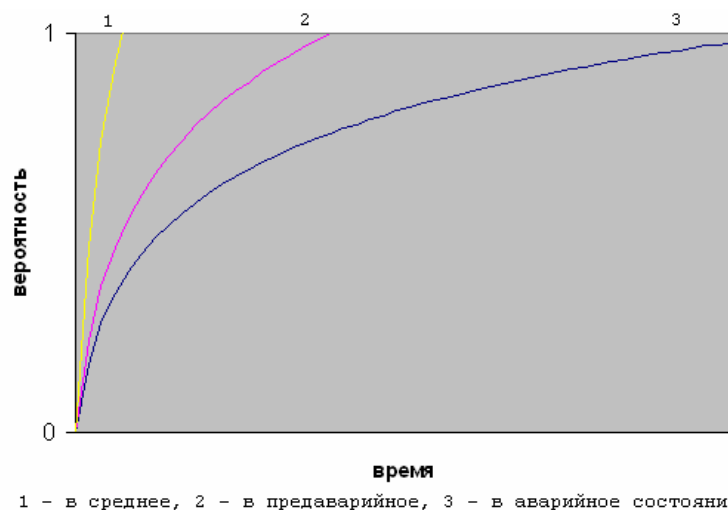


Рис. 13. Зависимость от времени вероятностей перехода из нормального в среднее, предаварийное и аварийное состояния

Аналогичные соотношения имеют место как для системы, находящейся в «среднем» состоянии (зависимости вероятностей переходов в предаварийное и аварийное состояния), так и для системы, находящейся в предаварийном состоянии (зависимость вероятности перехода в аварийное состояние).

Очевидно, что полученные значения не отражают моделируемые процессы с высокой точностью и должны корректироваться в процессе функционирования реальной системы. Кроме того, в модель не введены факторы, повышающие функциональную надежность транспорта, например целенаправленным применением воздействий, переводящих систему из состояния с более низкой в состояние с более высокой вероятностью нормальной работы. Такими воздействиями будут проводимые ремонтно-восстановительные или профилактические работы (см. рис. 8). С их учетом жизненный цикл системы, показанный на рис. 12, можно представить рис. 14.

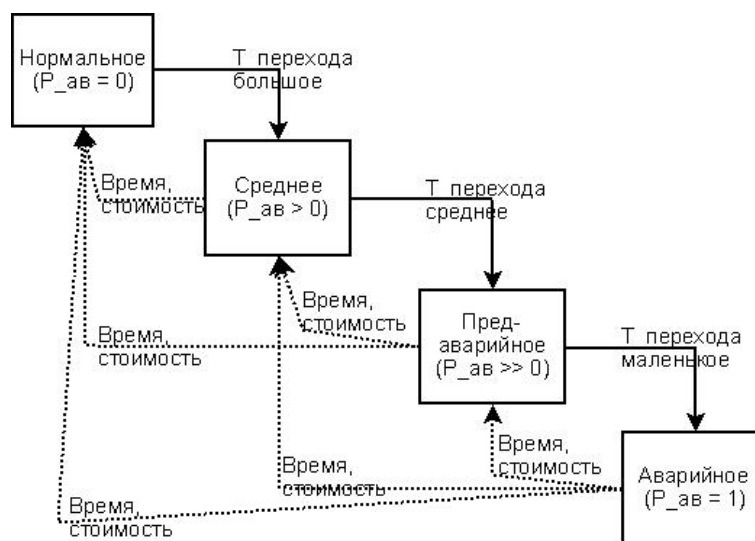


Рис. 14. ЖЦ системы с целенаправленными корректирующими воздействиями

Представленная в таком виде модель жизненного цикла может служить основой:

- для построения имитационной модели с последующим анализом и прогнозом состояния;
- для формирования иерархии моделей мониторинга в части определения вероятности аварийного события на элементарном участке трубопровода;
- для расчета вероятности аварии на протяженном участке;
- для расчета вероятности аварий на разветвленной системе трубопроводов.

Построенная на основе сформулированных выше допущений, описаний и результатов функциональная модель общей системы мониторинга жизнеобеспечения тепловых сетей показана на рис. 15.

Дадим краткие пояснения к предложенной системе.

1. Построение иерархии моделей аварийности ТС, использующих данные о состоянии всех элементарных участков и общей топологии сети:

- а) определение вероятности аварии на элементарном участке трубопровода – функционирует на основе моделей динамики повреждений в трубах (см. рис. 5–7, 9);
- б) расчет вероятности аварии на протяженном участке трубопровода – функционирует на основе данных, получаемых из уровня 1а, как описано в настоящем разделе;
- в) расчет вероятности аварий на разветвленной системе трубопроводов – функционирует на основе данных, получаемых из уровня 1б и данных о топологии сети.

2. Блок уточнения модели – использует результаты наблюдений за функционированием ТС для уточнения параметров и адаптации меняющимся условиям.

3. Подсистема мониторинга – поставляет результаты наблюдения за функционированием сети и данные об изменениях вследствие проведенных работ.

4. Хранилище данных – содержит полную информацию о текущем состоянии сети и историю всех изменений.

5. Подсистема прогнозирования и оценки аварий – использует данные о состоянии внешней среды и различных воздействиях и результаты моделирования для прогноза аварийных ситуаций, оценки их последствий, объемов и сроков ремонтно-восстановительных работ.

6. Подсистема планирования работ – использует данные из блока, формируемого на этапе (5).

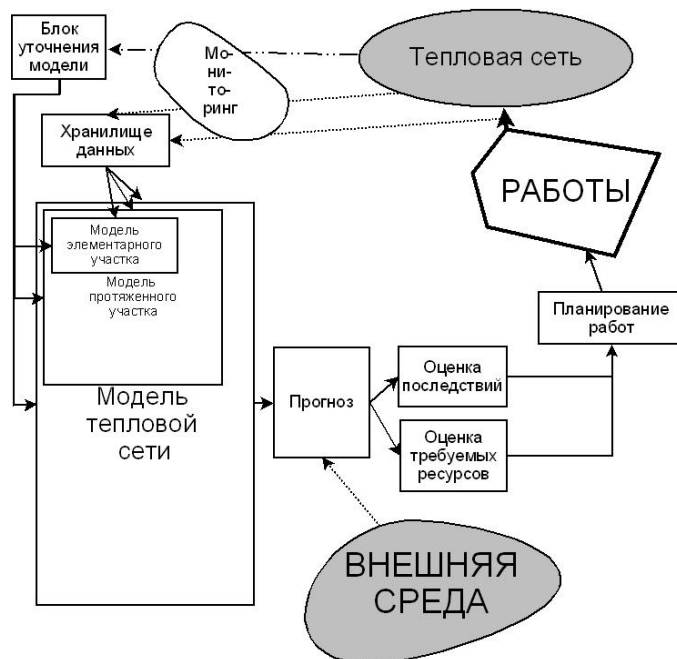


Рис. 15. Структура системы мониторинга жизнеобеспечения ТС

Для моделирования представляется целесообразным за элементарный участок трубопровода принять одно звено (трубу) как минимальную технологическую единицу, подлежащую

учету и обслуживанию. Для определения вероятности аварии на элементарном участке трубопровода – использует данные о состоянии труб, хранящиеся в БД, и бифуркационные модели динамики повреждений ТСТ, описанные выше. Полученные оценки вероятностей аварий для каждого звена (трубы) также помещаются в БД как один из параметров звена и хранятся там до следующего цикла пересчета параметров.

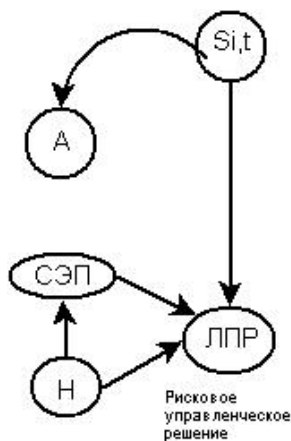


Рис. 16. Система принятия управленческого решения ЛПР, не имеющем информации о процессе развития аварийной ситуации

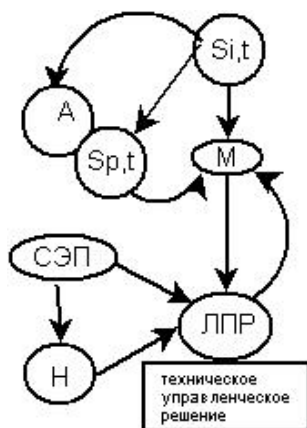


Рис. 17. Система принятия управленческого решения ЛПР на основе оценки траектории ТСТ (системы мониторинга ТСТ)

После очередного пересчета из БД выбирается информация об участках трубопроводов, не содержащих разветвлений, и звеньях, из которых они состоят. На основе полученных оценок вероятности аварий для отдельных звеньев с использованием формул (3; 4) рассчитываются оценки вероятностей аварий для линейных участков трубопроводов.

Среди полученных оценок выбираются оценки, превосходящие заданные пороговые значения, и принимается гипотеза о возможности аварии на таких участках. Исходя из принятой гипотезы, с использованием информации о структуре графа ТС, хранящейся в БД, оцениваются последствия такой аварии – необходимые перекрытия участков ТС, отключения абонентов, экономический и другой ущерб. На основании этих оценок составляется план первоочередных работ по обеспечению жизнеспособности системы ТС.

Используя описанные выше модели анализа аварийных ситуаций, дадим интерпретацию процедуры «управления риском». Система предотвращения аварии на основе оценки риска приведена на рис. 16, 17. На рисунках $S_i(t)$ обозначено техническое состояние ТСТ в момент t , $S_p(t)$ – прогноз аварии; СЭП – социально экономические последствия аварии; Н – население жилмассива; ЛПР – лицо, принимающее решение; М – система мониторинга текущей ситуации ТСТ.

В первом случае текущая ситуация ТСТ контролируется без применения технических средств, на основе субъективных оценок, с потерей достаточно большого блока информации о состоянии объекта. С другой стороны, до ЛПР доводятся требования по предотвращению СЭП. ЛПР традиционно принимает решение в условиях сильно ограниченных ресурсов.

Его управленческие решения и результат их реализации характеризуются как рискованные.

Во втором случае в распоряжении ЛПР имеется информация о техническом состоянии системы (состояния 1, 2, 3 модели рис. 8), а также прогнозы возможных событий, что позволяет получить технические решения по предотвращению аварий (ремонт 8, 9, 10 модели рис. 8). В соответствии со сказанным выше эти решения ЛПР переводят ТСТ в более стабильный класс функционирования и тем самым понижают «риск аварийной ситуации».

Список литературы

1. Полак Л. С., Михайлов А. С. Самоорганизация в неравновесных физико-химических системах. М.: Наука, 1983. 282 с.
2. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 344 с.
3. Реформа ЖКХ в Москве – проблемы и пути решения / Под ред. П. Н. Аксенова, В. Ф. Пивоварова. М.: Воениздат, 2004. 616 с.

4. Колотыркин Я. М. Металл и коррозия. М.: Металлургия, 1985.
5. Томашов Н. Д., Чернова Г. П. Теория коррозии и коррозионно-стойкие сплавы. М.: Металлургия, 1986.
6. Маннапов Р. Г. Оценка надежности аппаратов в условиях поверхностного разрушения технологическими средами // Химическое и нефтяное машиностроение. 1987. № 5. С. 11–12.
7. Овчинников И. Г., Елисеев Л. Л. Применение логистического уравнения для описания процесса коррозионного разрушения // Физико-химическая механика материалов. 1981. № 6. С. 30–35.
8. Волченко В. Н. Контроль качества сварных конструкций. М.: Машиностроение, 1986.
9. Маннапов Р. М. Оценка надежности химического и нефтяного оборудования при поверхностном разрушении // Химическое и нефтеперерабатывающее машиностроение. Серия: ХМ. М.: Цинтихимнефтемаш, 1988. С. 63.
10. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984.
11. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 310 с.
12. Чуличков А. И. Теория катастроф и развитие мира // Новый Акрополь. 2001. С. 34–52.
13. Арнольд В. И. Теория катастроф. М.: Наука, 1998. 128 с.
14. Малинецкий Г. Г., Курдюмов С. П. Нелинейная динамика и проблемы прогноза // Вестн. Российской академии наук. 2001. Т. 71. № 3. С. 210–232.
15. Арнольд В. И. Теория катастроф. М.: Наука, 1998. 128 с.
16. Малинецкий Г. Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. Введение в нелинейную динамику. М.: Эдиториал УРСС, 2000.
17. Овчинников И. Г., Сабитов Х. А. Моделирование и прогнозирование коррозионных процессов. Деп. ВИНТИ. 1982. № 1342–82.
18. ГОСТ 27.302-86. Надежность в технике. Методы определения допустимого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин. М.: Изд-во стандартов, 1987.

Материал поступил в редколлегию 07.05.2009

К. А. Bebeshev, A. V. Vragov, E. V. Vragova

MODELING DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF CORROSION OF PIPELINE

We consider the construction of models of the dynamics of an emergency on the pipeline due to corrosion. We consider the wall of the pipe as an object, under the influence of the environment subject to continuous change of properties from the moment of its commissioning process to the moment of withdrawal from the manufacturing process because of an emergency. Pipe wall, in turn, is seen as part of a large object – pipes, which turn to be seen as a certain portion of the pipeline system.

Keywords: modeling, accident, pipeline transport.