

ISSN 2304-9081

Учредители:  
Уральское отделение РАН  
Оренбургский научный центр УрО РАН

**Бюллетень**  
**Оренбургского научного центра**  
**УрО РАН**  
(электронный журнал)



**2014 \* № 2**

On-line версия журнала на сайте  
<http://www.elmag.uran.ru>

© Коллектив авторов, 2014

УДК 004.896 : 681.5.05

*Ю.Р. Владов, Ю.М. Нестеренко, А.Ю. Владова, М.Ю. Нестеренко*

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОГЕННО-ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ С АГРЕГИРОВАННЫМИ МОДЕЛЯМИ**

Оренбургский научный центр УрО РАН, Отдел геоэкологии, Оренбург, Россия

*Цель.* Повышение эффективности функционирования техногенно-природных объектов за счет идентификации и прогнозирования их состояний.

*Материалы и методы.* Методы идентификации и прогнозирования состояний техногенно-природных объектов, основанные на агрегированных моделях.

*Результаты.* Найдены аналитические решения дифференцированных математических моделей для основных типов повреждений металлических оболочек техногенно-природных объектов, представляющие собой полиномы 3 и 4-го порядка точности с коэффициентами, выраженными через интенсивности марковских потоков повреждений и восстановлений. В соответствии с разработанными методиками определены собственные и взаимные, абсолютные и относительные интенсивности. В частности, для магистральных трубопроводов ОНГКМ собственные интенсивности лежат в диапазоне от 0,179 до 1,25 1/год, а взаимные – от 0,012 до 0,026 1/год.

*Заключение.* Научно обоснованы и разработаны методы прогнозирования состояний потенциально опасных техногенно-природных объектов. Предложены агрегированные модели прогнозирования как дифференцированного, так и интегрированного плана. Оба типа моделей учитывают всю диагностическую информацию, полученную по повреждениям металлической оболочки каждого выделенного объекта.

*Ключевые слова:* прогнозирование состояний, техногенно-природные объекты, методы идентификации, агрегированные модели.

---

---

*Y.R. Vladov, Y.M. Nesterenko, A.Y. Vladova, M.Y. Nesterenko*

## **IDENTIFICATION AND PREDICTION OF A TECHNICAL CONDITION TECHNOGENIC AND NATURAL OBJECTS**

Orenburg Scientific Centre UrB RAS, Department of Geoecology, Orenburg, Russia

*Purpose.* More efficient use of man-made and natural objects by identifying and predicting their states.

*Materials and Methods.* Methods of identification and forecasting of man-made and natural objects, based on aggregate models.

*Results.* Analytical solutions of mathematical models differentiated by major types of damage to the metal shells of technogenic and natural objects representing polynomials 3 and 4-th order with coefficients found through the flux intensity of damage and recovery. In accordance with established procedures defined self and mutual, and the absolute and relative intensities of the flows. In particular, for pipeline ONGKM own intensity of said streams is in the range from 0.179 to 1.25 1/year and reciprocal - from 0.012 to 0.026 1/year.

*Conclusion.* Scientifically justified and developed methods for predicting potentially dangerous states technogenically natural objects. The proposed methods are based on differentiated and integrated prediction models. Models use the entire set of diagnostic information, and therefore belong to the class of aggregate models.

*Keywords:* man-made and natural objects, technical condition, identification methods, forecasting, aggregate models.

## **Введение**

Известно, что отказы в техногенно-природных объектах (ТПО) всегда сопряжены со значительным материальным и экологическим ущербом. Увеличивающаяся продолжительность эксплуатации ТПО, а также износ оборудования выдвигают вопросы идентификации и прогнозирования их состояния в ранг наиболее важных научных проблем [1]. Характерной особенностью текущего периода разработки Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения (ОНГКМ) является переход на стадию падающей добычи, что сопровождается нарастающим поступлением в продукцию пластовых вод, активным возрастанием коррозионной активности среды, заставляющую выделить язвенную коррозию как главную составляющую механизма повреждения. Трубопроводы ОНГКМ выработали свой проектный нормативный ресурс и дальнейшее их функционирование требует использования научно обоснованных режимов эксплуатации, базирующихся на методах аналитической идентификации и прогнозирования с агрегированными моделями.

Установлено, что эксплуатация ТПО характеризуются следующими существенными признаками: ведущий процесс повреждения – коррозионный; значительный объем получаемой диагностической информации о внутренних и внешних повреждениях металлической оболочки; необходимость сохранения привязки диагностической информации к местоположению повреждений; отсутствие возможности непосредственного измерения и синхронного получения входной и выходной информации; большой временной интервал (5-8 лет) между инспекциями и трудности «стыковки» результатов разновременных диагностирований; отсутствие необходимой априорной информации о структуре и параметрах соответствующих моделей изменения состояний.

### **Анализ проблемы.**

Анализ литературных источников по идентификации и прогнозированию в классическом смысле позволяет выделить следующие методы решения проблемы: локальные, характеризующие настоящее и будущее состояние металла в месте выделенного повреждения (потеря массы металла или изменение глубины каверны); причинно-следственные, связанные с анализом временных рядов и требующих больших объемов непрерывных ретроспективных данных; методы идентификации и прогнозирования механической прочности металла трубопроводов, предполагающие моделирование на микроуровне и использующие дифференциальные уравнения в частных производных, в принципе

предназначенные для описания сплошных сред. И, наконец, методы аналитической идентификации и прогнозирования с агрегированными моделями, характеризующие настоящие и будущие состояния всей металлической оболочки, но в комплексном (интегрированном) плане. Эти методы существенно снижают размерность задачи и позволяют сохранить, что весьма важно, привязку информации к местоположению повреждений.

В известных работах в области идентификации и прогнозирования состояния ТПО, основанных в подавляющем большинстве на локальных моделях, выделены типичные механизмы повреждений, составлены физико-механические и математические модели процессов на основе локальных параметров. Большинство из них описывает потерю массы металла или изменение глубины единичной каверны. Так, параметры и математические модели коррозионных процессов, предложенные в работах П. Азиса, Ж. Миткальфа, Л.Я. Цикермана, Ф. Чемпиона и др. носят локальный характер, поэтому недостаточно адекватно отражают коррозионные процессы в трубопроводах:

$$y = y_0[1 - \exp(-\alpha \cdot t)]; \quad (1)$$

$$y = y_0[1 - A_1 \exp(-\frac{t}{T_1}) - A_2 \exp(-\frac{t}{T_2})], \quad (2)$$

где  $\alpha, A_1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2}, A_2 = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$  – параметры моделей.

Анализируя математические модели (ММ) с изменением и скоростью изменения процесса коррозии, видно, что некоторые из них излишне упрощены и могут использоваться только для предварительных расчетов (Биккарис А., Веллнер Е., Годарт Х., Друм Г.). Другие ММ позволяют прогнозировать скорость коррозии только в месте расположения дефектов (Горман И.В., Купер А.С., Лысая А.И., Середа П., Пальмер И.Д., Цикерман Л.Я. и др.):

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{dy(0)}{dt} \exp(-\alpha \cdot t); \quad (3)$$

$$\lg(y') = Ay' + By + c; \quad (4)$$

$$y' = A \cdot \exp(-\frac{t}{T}) C_{H_2S}^D P^E; \quad (5)$$

$$y' = y'_0 \frac{A}{t + A}; y' = \frac{t}{At^2 + Bt + C}, \quad (6)$$

где  $y' = \frac{dy(t)}{dt}$ ,  $t, C_{H_2S}, P$  – скорость изменения коррозионного процесса,

время, концентрация сероводорода и давление.

Они используют незначительную часть получаемой диагностической информации, что априорно увеличивает погрешность соответствующих математических моделей. Таким образом, известные методы идентификации и прогнозирования состояния ТПО нефтегазовых месторождений на базе локальных параметров, устанавливая периодичность, способ контроля, признаки для оценки вида повреждения, а также степень потенциальной опасности локальных повреждений, не позволяют количественно оценивать состояние всего многокилометрового объекта, наблюдать изменения до и после ремонтов, проводить сравнительный анализ и прогнозировать состояние с учетом выявленных аномалий.

Схема решения задачи прогнозирования на базе известных методов, связанных с анализом временных рядов (например, метод скользящего среднего, в котором прогнозное значение строится усреднением значений за несколько прошедших моментов времени; метод экспоненциального сглаживания, в котором учитывается отклонение предыдущего прогноза от реального показателя и метод проецирования тренда, в котором строится прямая, в среднем наименее уклоняющаяся от массива точек) также не может быть широко применима для состояния ТПО, так как характерным для этих методов является использование локальных параметров и прогноз на ближайшее будущее осуществляется только при известности априорно аналоговой закономерности. Группа причинно-следственных (каузальных) методов, среди которых можно выделить регрессионные методы, устанавливающие регрессионные зависимости по статистическим данным и имитационные методы, основанные на мнениях экспертов, имеют удовлетворительную точность прогноза, также требуют больших объемов непрерывных ретроспективных данных. На микроуровне объект представляется как сплошная среда с распределенными параметрами. Для описания процессов функционирования таких объектов используют дифференциальные уравнения в частных производных. На макроуровне объект рассматривается как динамическая система с сосредоточенными параметрами. Математические модели макроуровня представляют собой системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Эти модели используют при определении параметров технического объекта и его функциональных элементов. Поскольку повреждения всегда дискретны, то состояние ТПО является объектом исследования макроуровня, процессы в котором описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Таким образом, для учета всего объема данных, полученных в результате внутритрубной дефектоскопии, нужны агрегированные модели, с помощью которых одновременно снижается на порядок размерность задачи идентификации и прогнозирования состояния при сохранении привязки информации к местоположению повреждений. Агрегированные математические модели оперируют таким свойством коррозионной поверхности, как рельефность, поскольку основные факторы, определяющие работоспособность металла, такие как усталостное сопротивление; герметичность сварных швов; термическое и электростатическое контактное сопротивление; трение и износ зависят от качества коррозионной поверхности.

### Агрегированные модели.

Агрегированные модели подразделены на аналитические и мультиграфовые. Рельефность диагностической информации характеризуется основными показателями агрегирования: степенью равномерности (7), рассеивания (8) и экстремальности (9):

$$N_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|; \quad (7)$$

$$N_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (8)$$

$$N_z = \frac{1}{k} \left( \sum_{i=1}^k |x_i - \bar{x}|_{\max} + \sum_{i=1}^k |x_i - \bar{x}|_{\min} \right), k = 5. \quad (9)$$

Агрегированные аналитические модели подразделены по сложности на модели с одиночными параметрами агрегирования и совокупностью этих параметров. Модели на основе комплекса параметров учитывают значимость входящих в них одиночных различным образом: аддитивно (10), мультипликативно (11) и комбинировано (12).

$$U_{\text{адд}} = \alpha_1 N_a + \alpha_2 N_q + \alpha_3 N_z; \quad (10)$$

$$U_{\text{млт}} = N_a \alpha_1 + N_q \alpha_2 + N_z \alpha_3; \quad (11)$$

$$U_{\text{кмб}} = \xi U'_{\text{адд}} + (1-\xi) U'_{\text{млт}}, \quad (12)$$

где  $\alpha_i$  – весовые коэффициенты, определяемые методом экспертных оценок с соблюдением условия нормирования;

$\xi$  – коэффициент, учитывающий относительное количество показателей агрегирования, входящих в частичные аддитивную  $U'_{\text{адд}}$  или мультипликативную  $U'_{\text{млт}}$  модели.

Однако метод на основе агрегированных аналитических моделей не по-

зволяет распознавать и дифференцировать коррозионные состояния ТПО и выявлять всю их совокупность, что необходимо для дальнейшей разведки информации при построении оптимальных графиков проведения технического диагностирования, обслуживания и ремонтов.

Эксплуатация ТПО связана с осуществлением многопланового контроля за их коррозионным состоянием. Ведущим методом получения диагностической информации в настоящее время является внутритрубная дефектоскопия (ВТД). Согласно спецификации, снаряд-дефектоскоп «Ультраскан» обнаруживает повреждения с диаметром более 10 мм и глубиной более 1,5 мм. Однако проведение ВТД само по себе не решает проблемы оценки состояния ТПО. Это только первый этап, на котором выявляются повреждения и создается необходимая база данных для проведения идентификации и прогнозирования состояния [2].

ТПО характеризуется множеством коррозионных состояний, знание которых позволяет формировать рациональные управленческие решения. Из теории управления известно, что определять вероятности состояний объекта рационально с помощью графовых моделей, где на основании количества состояний и интенсивностей переходов строится соответствующий граф, описываемый системой дифференциальных уравнений. Но, к сожалению, графовые модели применительно к идентификации и прогнозированию состояния ТПО практически не используются.

Накопленный объем информации, на наш взгляд, достиг насыщения и определил круг задач, неразрешимых традиционными способами. Принципиальный выход из создавшегося положения заключается в разработке новых методов идентификации и прогнозирования состояния ТПО, позволяющих решить задачу интеллектуального управления его техническим состоянием на более высоком уровне, существенно сократить затраты материальных и временных ресурсов на проведение диагностирования, а также технического обслуживания и ремонтов [3].

Работа выполняется в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и техники, постановлениями Правительства России и Перечнем критических технологий федерального уровня, в том числе: «Снижение риска и уменьшение последствий природных и техногенных катастроф», «Трубопроводный транспорт нефти и газа», «Компьютерное моделирование» и другими.

## **Дифференцированный подход к решению задачи прогнозирования состояний ТПО.**

Ввиду наличия большого количества повреждений металлической оболочки, состояние ТПО рассматривается в двух аспектах: дифференцированном и интегрированном. Предложена новая классификация моделей прогнозирования состояния ТПО, особенностью которой является охват новых агрегированных моделей, учитывающих множество повреждений.

Для дифференцированного подхода введена новая градация состояния ТПО – тип повреждения, представляющая собой диапазоны геометрических характеристик наиболее вероятных повреждений. Методика определения количества типов повреждений ТПО, входными данными которой является массив остаточных толщин стенки металлической оболочки, а выходными – границы значимых интервалов остаточных толщин включает в себя следующие этапы: определение глубины повреждений типа «потеря металла»; определение фактических толщин стенок трубопровода в местах повреждений путем вычитания из толщины стенки их глубины; нормирование значений остаточной толщины стенки за счет нахождения стандартного отклонения для массива данных с толщинами стенок в местах повреждений и деления его значений на найденное стандартное отклонение; определение основных статистических характеристик нормированного массива; разбиение на интервалы, определение классового диапазона путем деления размаха варьирования на выбранное количество интервалов; нахождение абсолютных, относительных и накопленных частот попадания данных в каждый интервал и построение гистограммы, полигона и кумулятивной кривой; назначение пороговой величины по относительной частоте попадания в интервалы. В дальнейших исследованиях учитываются только те интервалы, относительная частота которых превышает пороговое значение. Интервал с минимальными границами соответствует исходному состоянию  $S_0$ . Следующие типы повреждений  $S_1, S_2, \dots$  нумеруются в порядке увеличения границ интервала.

Исследования ТПО, прошедших не менее двух ВТД по предложенной методике позволяет установить следующие соотношения количества типов повреждений на входе и выходе и поставить им в соответствие определенный тип мультиграфовых моделей с восемью при трех типах повреждений, двадцатью двумя при четырех типах и сорока двумя состояниями при пяти типах повреждений. Они характеризуются как полные, размеченные мультиграфы,



ребра которых заданы интенсивностями двух встречных марковских потоков случайных событий (повреждений, переводящих ТПО в следующее состояние и восстановлений, переводящих ТПО в предыдущее состояние).

### Декомпозиция задачи прогнозирования состояний ТПО.

Решение задачи прогнозирования с использованием вероятностей  $P_i(t)$  с временным аргументом  $t$  подразумевает на первом этапе нахождение интенсивностей отмеченных потоков случайных событий. Решение структурированной задачи идентификации на примере 4-х типов повреждений представлено на рисунке 1.

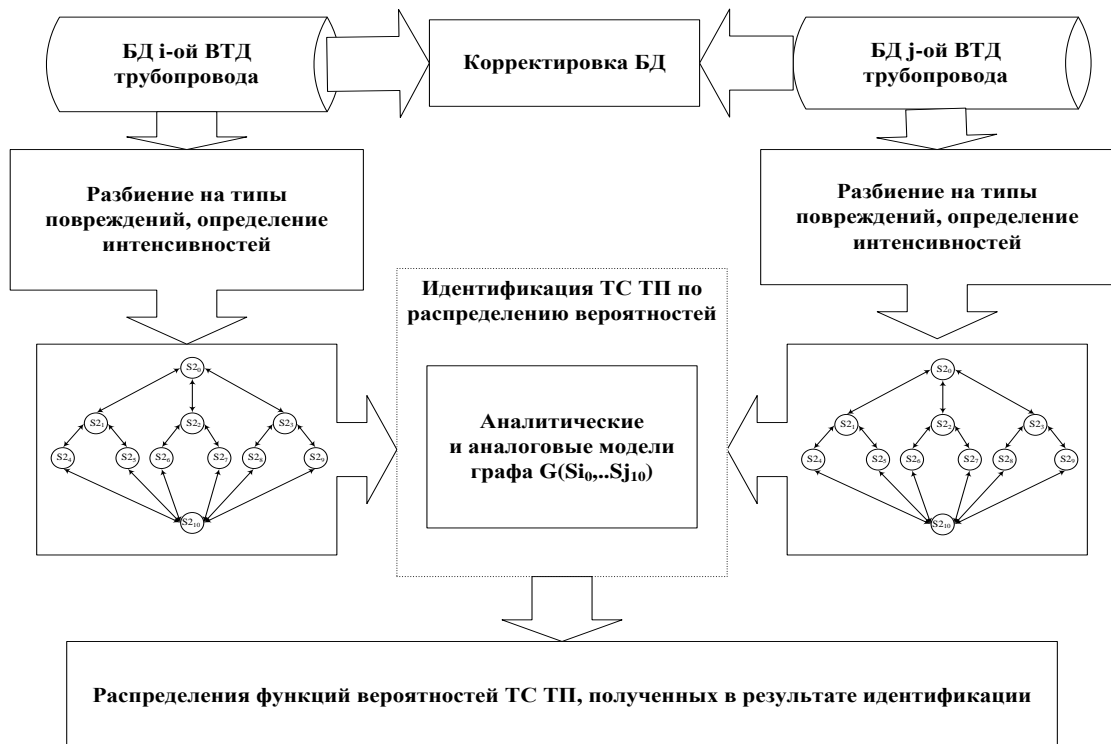


Рис. 1. Решение структурированной задачи идентификации.

Построим полный размеченный мультиграф на примере ТПО с четырьмя типами повреждений металла, прошедшего две ВТД. Назовем состояния системы:  $S_{10}, S_{20}$  – исходные состояния ТПО на этапе длительной эксплуатации для первой и второй ВТД;  $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{21}, S_{22}, S_{23}$  – состояния, определяемые оставшимися тремя типами повреждений;  $S_{14}, \dots, S_{19}$  и  $S_{24}, \dots, S_{29}$  – производные состояния, характеризующиеся композицией двух типов повреждений; конечные состояния  $S_{110}, S_{210}$  – состояния, в которых проявляются все выявленные типы повреждений для обеих ВТД;  $\lambda_{1ij}, \lambda_{2ij}, \mu_{1ji}, \mu_{2ji}$  – взаимные интенсивности потоков повреждений и восстановлений как случайных событий между состояниями каждого графа;  $\lambda_{ii}^{дэ}, \mu_{ii}^{дэ}$  – интенсивности потоков случайных событий в период длительной эксплуатации;  $\lambda_{12ii}, \mu_{21ii}, \lambda_{ii}^{пр},$

$\mu^{np}_{ii}$  - переходные интенсивности потоков случайных событий между мультиграфами, отражающие интенсивности изменения состояний между диагностированиями и играющие ключевую роль при прогнозировании, поскольку позволяют воссоздать прогнозный граф.

Полученная таким образом мультиграфовая модель, представляет собой полный размеченный ориентированный граф, пример которого для 4 типов повреждений приведен на рисунке 2.

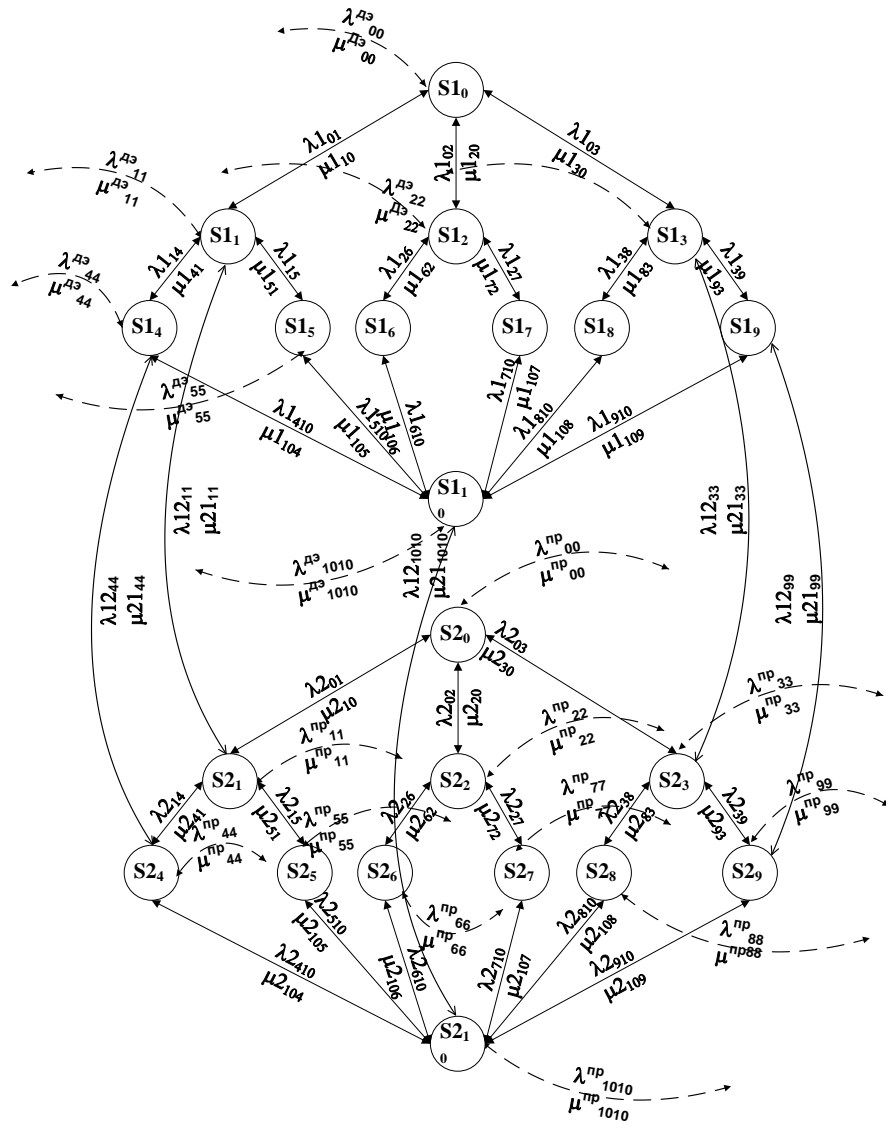


Рис. 2. Графовая модель состояний ТПО с четырьмя типами повреждений, полученная по результатам двух ВТД (для упрощения графовой модели некоторые дуги пропущены, например, дуга, связывающая состояния  $S1_2$  и  $S2_2$ ).

Такой мультиграф описывается системой из двадцати двух дифференциальных уравнений относительно вероятностей состояний  $p1_i$  и  $p2_i$ . Одно из уравнений для исключения избыточности информации заменяется на алгеб-



Составлена структурная схема решения, которая реализована в интегрированной среде VisSim. Полученное в результате моделирования (рис. 4) изменение вероятностей состояний рассматриваемого ТПО практически совпадает с изменениями вероятностей этих состояний, найденными аналитическим путем.

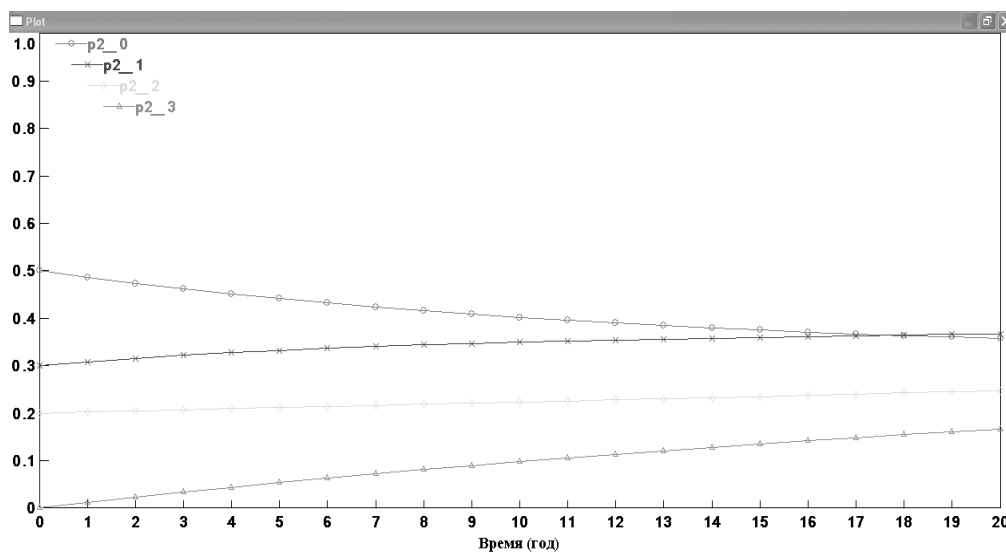


Рис. 4. Изменения вероятностей состояний  $p_{2_0}(t)$ ,  $p_{2_1}(t)$ ,  $p_{2_2}(t)$  и  $p_{2_3}(t)$ , найденные путем моделирования в интегрированной среде VisSim.

### Прогнозирование состояний ТПО по мультиграфовым моделям.

Рациональным подходом к прогнозированию состояний ТПО является использование структуры из формирующего и прогнозирующего фильтров. Первый фильтр выполняет задачу идентификации состояний, а второй - их прогнозирование. Схема процесса аналитического прогнозирования включает в себя следующие блоки: базу данных (с корректировкой); формирующий фильтр; задание потенциально-опасного уровня вероятности; прогнозирующий фильтр; остаточный ресурс.

Наиболее важной в методике реализации прогнозирующего фильтра (рис. 5) является операция нахождения модели эквивалентной вероятности состояний в виде различных усредненных функций, полученных в результате идентификации.

Усредненная функция находится из следующего нормированного семейства: средняя гармоническая; средняя геометрическая; средняя квадратическая. Нормирование предусматривает линейные преобразования средних функций к одной, отражающей тенденцию возрастания в сторону максимально допустимой величины.

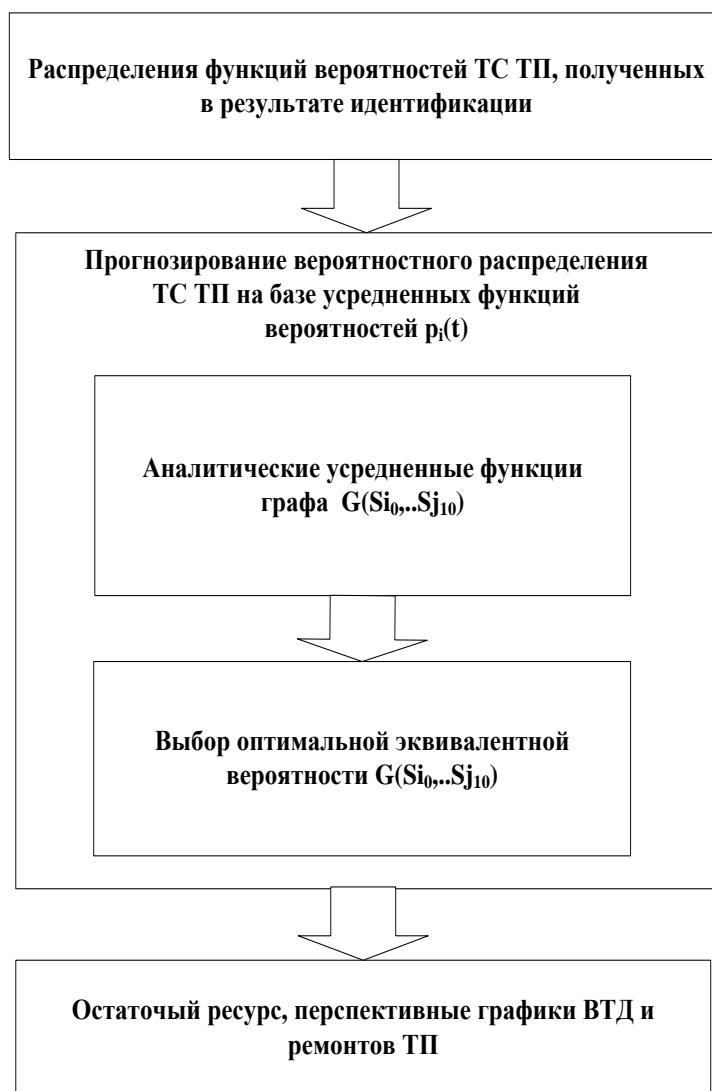


Рис. 5. Структура решения задачи прогнозирования состояний ТПО на основе прогнозирующего фильтра.

На рисунке 6 изображены прогнозируемые эквивалентные вероятностные функции для одного из соединительных трубопроводов ОНГКМ.

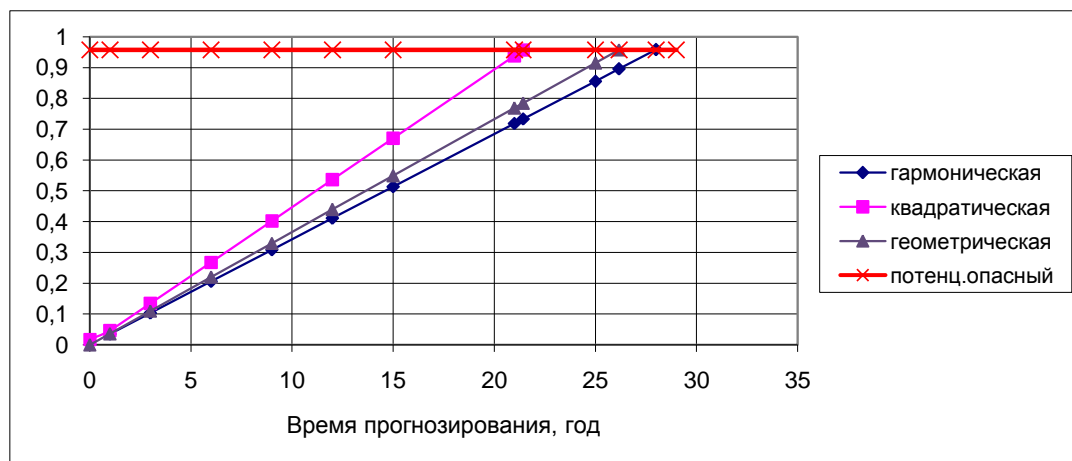


Рис. 6. Графики эквивалентных функций вероятности состояний одного из соединительных трубопроводов ОНГКМ.

Использование аналитических моделей и соответствующих мультиграфов позволяет получить наглядное представление о процессе изменения состояний во времени, выявить ряд дополнительных связей и параметров конечной модели и количественно оценить вероятности состояний и интенсивности переходов. На базе мультиграфовых моделей удастся получить эквивалентные вероятностные функции, нормированные для тенденции ухудшения до предельной (с учетом коэффициента запаса) величины.

Интегрированный подход предполагает получение агрегированных, корреляционных, идентификационных и прогнозных моделей, всесторонне характеризующих величину и интенсивность изменения состояния потенциально-опасных ТПО на этапе длительной эксплуатации [5] и в данной статье ввиду ограниченного объема не рассматривается.

### **Заключение**

Научно обоснованы и разработаны методы аналитической идентификации и прогнозирования состояния потенциально опасных ТПО, в рамках которых предложены новые, как дифференцированные, так и интегрированные математические модели прогнозирования их состояния, учитывающие всю полноту диагностической информации по повреждениям металлической оболочки.

Найдены аналитические решения дифференцированных математических моделей для основных типов повреждений ТПО, представляющие собой полиномы 3 и 4-го порядка точности с коэффициентами, выраженными через интенсивности марковских случайных потоков повреждений и восстановлений. В соответствии с разработанными методиками определены собственные и взаимные, абсолютные и относительные значения интенсивностей. В частности, для магистральных трубопроводов на этапе длительной эксплуатации собственные абсолютные интенсивности лежат в диапазоне от 0,179 до 1,25 1/год, а взаимные относительные интенсивности - от 0,012 до 0,026 1/год.

Задача прогнозирования состояния ТПО по эквивалентным вероятностным функциям предполагает три основных этапа: идентификацию на основе формирующего фильтра; построение прогнозирующего фильтра; оценку остаточного ресурса.

Обработка информации для длительно эксплуатирующихся ТПО показывает, что характерной особенностью являются три типа повреждений, а математическая модель представлена системой из восьми обыкновенных диффе-

ренциальных уравнений с постоянными коэффициентами в виде интенсивностей потоков повреждений и восстановлений. Найдено обобщенное решение указанной системы относительно функций вероятностей в виде полиномов с коэффициентами, выраженными через интенсивности потоков повреждений и восстановлений при соответствующих степенях текущего времени.

Созданные в процессе идентификации и прогнозирования математическое, методическое, аналитическое, программное и другие обеспечения позволяют строить более совершенные автоматизированные системы интеллектуального управления состоянием техногенно-природных объектов [5].

#### **ЛИТЕРАТУРА.**

1. Владов Ю.Р. Идентификация систем. Оренбург: ОГУ, 2003. 202 с.
2. Владов Ю.Р. Аналитическая идентификация технического состояния и эффективность функционирования промышленных объектов. Автоматизация в промышленности. 2005. 4: 9-12.
3. Владов Ю.Р., Кушнарченко В.М., Владова А.Ю. и др. Идентификация технического состояния теплоэнергетического оборудования. Оренбург: ОГУ, 2004. 200 с.
4. Владова А.Ю., Владов Ю.Р. Исследование вероятностей коррозионных состояний продуктопроводов моделированием на графах. Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2008. 5: 49-52.
5. Владов Ю.Р., Владова А.Ю. Построение и моделирование систем интеллектуального управления состоянием техногенных объектов. Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2013. 243 с.

*Поступила 24.06.2014 г.*

*(Контактная информация: **Владов Юрий Рафаилович** – д.т.н., профессор, заведующий лабораторией «Технологии управления природопользованием» отдела геоэкологии ОНЦ УрО РАН, 460014, г. Оренбург, ул. Набережная, 29, тел. 8 (3532) 77-56-70, факс 8 (3532) 77-06-60, e-mail: [geoecol-onc@mail.ru](mailto:geoecol-onc@mail.ru)).*