



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ

Э. Ф. ГАРФ, П. С. ЮХИМЕЦ, В. П. ПАЛИЕНКО, Р. А. СПИЦА П. П. ВОРОШКО,
С. В. КОБЕЛЬСКИЙ, В. И. КРАВЧЕНКО, И. Г. РУБАН

Принципиальная схема геоинформационной системы (ГИС) включает базу данных о состоянии участков трубопроводов и аналитический блок для принятия соответствующих решений. Отличительными особенностями ГИС является возможность оценки опасностей и риска аварий трубопровода с учетом прогнозирования остаточного ресурса на основе статистической обработки результатов обследования в шурфах, оценки динамики приповерхностной части литосферы в районах пролегания трубопроводов, определения напряженно-деформированного состояния (НДС) типовых элементов трубопроводов методом конечных элементов, в том числе при наличии поверхностных непрямоподобных дефектов.

Block-diagram of geoinformation system (GIS) includes a data base on the condition of pipeline sections and an analytical block for taking appropriate decisions. GIS features include the ability of evaluation of the hazards and risk of pipeline failure, allowing for residual life prediction based on statistical processing of the prospect-hole examination results, evaluation of the dynamics of subsurface part of the lithosphere in regions of pipeline location, determination of SSS of typical pipeline elements by FEM method, also in the presence of surface not cracklike defects.

Главной и первостепенной задачей трубопроводной компании является обеспечение безопасности и надежной работы трубопроводов при минимальных затратах на поддержание их жизненного цикла, что может быть достигнуто при использовании современных подходов к их эксплуатации.

Управление трубопроводными системами связано со сбором, обработкой, распределением и хранением разнообразной технической, оперативно-распорядительной, финансовой и т. д. информации, служащей базисом для решения различных задач — контроля качества работ, эксплуатации систем и мониторинга их технического состояния, формирования технических паспортов объектов трубопроводных систем, выпуска документации, управления имущественным хозяйством и др. [1]. Значительная часть данных, используемых в процессе проектирования, строительства и эксплуатации трубопроводных систем, имеет пространственную компоненту, характеризующую объекты и явления окружающей среды с точки зрения их географического размещения, вследствие чего организация эффективной взаимосвязи между данными различных типов и оперирование ими осуществляется на основе использования геоинформационных технологий.

Геоинформационные технологии являются важным звеном современных исследований на этапах проектирования, строительства и эксплуатации народнохозяйственных объектов различного назначения. Реализованные в современных

ГИС возможности факторного и комплексного моделирования пространственных объектов и явлений, исследования их статических и динамических характеристик позволяет рассматривать их как универсальные средства анализа и синтеза пространственных данных.

В современном понимании ГИС — это информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственно-координированных данных. Она содержит данные о пространственных объектах в форме их цифровых представлений (векторных, растровых, квадратомиических и иных), включает соответствующий задачам набор функциональных возможностей, в которых реализуются операции геоинформационных технологий, поддерживаемых программным, аппаратным, информационным, нормативно-правовым, кадровым и организационным обеспечением.

Актуальным направлением развития современных ГИС является создание эффективных систем не только сбора, но и анализа данных. Именно на решение задачи создания экспертной ГИС оценки технического состояния трубопроводов и прогнозирования их остаточного ресурса ориентирована данная работа.

Одной из основных причин сложившейся в последние годы тенденции роста отказов и крупных аварий трубопроводов является фактический срок их эксплуатации. По данным работы [2] доля газопроводов РФ, эксплуатируемых 10...20 лет,



составляет 38, более 25 лет — 25, свыше 30 лет — 6 %. Можно с уверенностью утверждать, что количество трубопроводов Украины, исчерпавших нормативный ресурс или приближающихся к этому, также значительно. С увеличением срока эксплуатации трубопровода при определенных условиях под действием термических и механических нагрузок, влияния окружающей среды происходят коррозионные и эрозионно-коррозионные процессы, а также насыщение металла новыми химическими элементами, что ведет к развитию дефектов, которые вначале эксплуатации не имели критических размеров. Возрастает вероятность повреждения отдельных участков трубопроводов, связанных с их выпучиванием и образованием гофров, увеличением напряжений из-за сдвига грунта, механических повреждений. Поэтому принятие решений о возможности продления сроков эксплуатации должно осуществляться дифференцированно с учетом особенностей эксплуатации каждого отдельного участка и его технического состояния. Это обстоятельство, а также переход от традиционного регламентного ремонтно-технического обслуживания трубопроводов к эксплуатации по техническому состоянию предопределило принципиальную схему ГИС, которая включает базу данных о состоянии участков трубопроводов и аналитический блок для принятия соответствующих решений.

Для создания ГИС оценки технического состояния трубопроводов в качестве базового использован программный продукт корпорации MapInfo версии 6.0, относящийся к настольным ГИС-пакетам. К его преимуществам относится относительно небольшая стоимость, нетребовательность к аппаратным ресурсам, простота в использовании.

Формирование базы данных ГИС трубопроводной компании, предназначенной для хранения всех доступных на текущий момент данных о ее трубопроводах, включая сведения о пересечениях, раскладке труб, типах грунтов, потенциалов электрохимзащиты, состоянии изоляционного покрытия, обнаруженных дефектах, использованной трубопроводной арматуре, рабочих параметрах, топографические карты коридоров трубопроводов и др. осуществляется на основе сведений, полученных из технической документации и при обследованиях трубопроводов. Объем информации, собираемый на трубопроводе, определяется согласно работе [3] с учетом нормативных требований [4], что создает предпосылки для ее интеграции с существующими ГИС.

В соответствии с Инструкцией диагностирование и оценка технического состояния трубопроводов осуществляется в следующей последовательности:

анализ технической документации;

уточнение прохождения трассы трубопровода, изучение особенностей местности по трассе трубопровода и определение состояния изоляционного покрытия приборным надтрассовым методом;

составление индивидуальной программы технического диагностирования трубопровода с учетом наличия зон возможного коррозионного износа и трещинообразования, а также результатов проверки состояния изоляционного покрытия; наружный осмотр трубопровода в шурфах и измерения; расчет трубопровода на статическую прочность и прогнозирование остаточного ресурса.

Объем информации базы данных структурирован:

- общетехническая и эксплуатационная информация о трубопроводе;
- надповерхностные информационные и измерительные объекты трубопровода;
- технологические элементы трубопровода;
- пересечения трубопровода;
- результаты обследований в шурфах.

Для сбора данных используются таблицы (например, табл. 1).

Интерфейс базы данных предоставляет пользователю возможности просматривать данные различного типа, выполнять запросы, редактировать существующие данные.

Учитывая географические аспекты особенностей трубопроводов, в систему включено геодезическое позиционирование объектов. В итоге комплексное использование результатов обследований и технической документации осуществляется на основе арбитражных координат спутниковой навигационной системы глобального позиционирования (GPS), обеспечивающих конвергенцию методов обследования, использующих различные физические методы и способы координатной привязки.

Ядром аналитического блока является модель оценки относительного риска, в соответствии с которой [5]:

Таблица 1. Информационные данные, вносимые в базу данных по объекту «Свеча»

Группа точки	
Индекс точки	
КМ по участку трубопровода	
Тип	
Высота (см)	
Технологический номер	
Диаметр × толщина стенки	
Дата установки	
Дата последних регламентных работ	
Состояние	
Чертеж	
Фотография	



Таблица 2. Категории последствий аварий

Категория аварийного участка трубопровода	Степень потерь, ущерба
III	Значительная
II	Весьма значительная
I	Тяжелая
V	Очень тяжелая

Риск аварии = Последствия × Вероятность. (1)

Степень потерь вследствие аварии на участке трубопровода поставлена в прямую зависимость от его категории согласно работе [6] (табл. 2). При этом оценка угрозы аварии вследствие воздействия какого-либо фактора риска проводится согласно табл. 3 [7].

Ранжирование рисков осуществляется с помощью матрицы 4×4 (табл. 4).

Определение технического состояния участка трубопровода проводится по следующим основным критериям, данные о которых накапливаются в результате проведения периодических обследований:

- A_1 — герметичность трубопровода;
- A_2 — состояние изоляционного покрытия;
- A_3 — коррозионное состояние наружной металлической поверхности трубопровода (остаточный ресурс);
- A_4 — качество сварных швов;
- A_5 — опасность коррозии трубопровода блуждающими токами;
- A_6 — наличие или отсутствие эрозионно-химической защиты (ЭХЗ);
- A_7 — наличие зон потенциального эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ);
- A_8 — коррозионная агрессивность грунта;
- A_9 — геодинамическая устойчивость;
- A_{10} — глубина заложения трубопровода.

Оценка риска выполняется по каждому из десяти критериев отдельно. Затем определяется суммарный риск аварии на участке S_T посредством суммирования оценок риска данного участка по всем десяти критериям — для этого каждой степени риска присваивается соответствующий балл:

$$S_T = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9 + A_{10}, \quad (2)$$

где A_1, A_2, \dots, A_{10} — балльная оценка степени риска аварии элемента трубопровода по соответствующему критерию.

При анализе рисков учитываются обе оценки (рис. 1). Снижение высокой степени риска по отдельным критериям проводится в первую очередь, что одновременно снижает суммарные оценки на данных участках. При этом в случае равенства степени риска по данному критерию в первую очередь

Таблица 3. Матрица вероятностей аварий

Вероятность	Описание
Низкая	По существу невозможная
Средняя	Потенциально возможная
Высокая	Возможна в период эксплуатации
Очень высокая	Событие могло бы произойти, если бы оборудование эксплуатировалось несколькими годами больше

Таблица 4. Матрица ранжирования рисков

Вероятность	Последствия			
	Значительные	Весьма значительные	Тяжелые	Очень тяжелые
Низкая	1	1	2	3
Средняя	1	2	3	3
Высокая	2	3	3	4
Очень высокая	3	3	4	4

снижение опасности аварии проводят на участках с большей суммарной оценкой. Кроме того, особое внимание должно быть обращено на участки с высокой суммарной оценкой S_T .

Как результат работы блока появляется возможность разрабатывать рекомендации для составления плана ремонта трубопровода, создавать коррозионные карты его участков, определять допустимое давление с учетом имеющихся ограничений со стороны обнаруженных дефектов.

Одним из ключевых критериев оценки риска является остаточный ресурс. Расчет остаточного ресурса основывается на статистической обработке данных периодических обследований трубопровода в шурфах [3, 8].

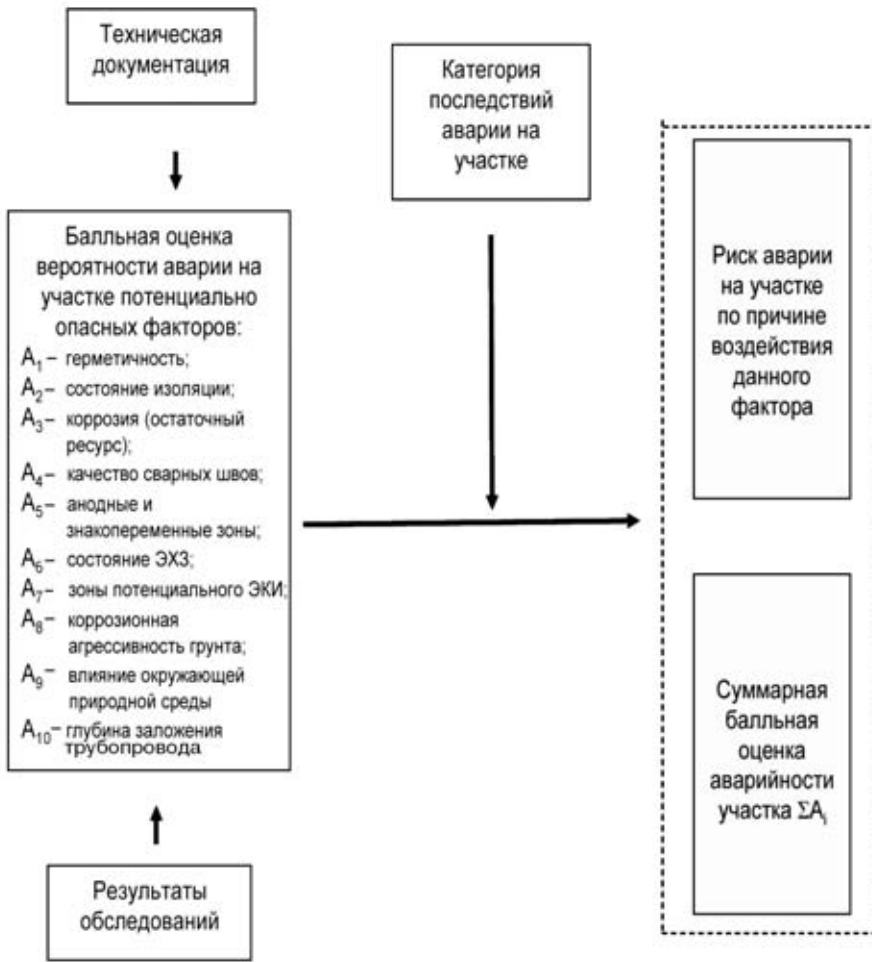
Целью статистической обработки является определение параметров функции распределения толщины стенки и оценка с требуемой достоверностью максимальной глубины коррозии стенок при минимальном объеме измерений в шурфах.

Прогнозирование остаточного ресурса линейной части трубопровода проводится на основании динамики изменения толщины стенки трубопровода до минимально допустимого размера с использованием результатов статистической обработки данных толщинометрии.

Прогнозируемый ресурс линейной части трубопровода $\tau_{пр}$ оценивается по формуле [9]:

$$\tau_{пр} = \frac{S_{ср\ min}^v - S_{расч}}{V}, \text{ лет,}$$

где $S_{ср\ min}^v$ и V — вероятное минимальное среднее значение толщины стенки трубопровода (мм) и скорость коррозии (мм/год) соответственно; $S_{расч}$ — расчетная толщина стенки трубопровода.



На основании вычисленного остаточного ресурса осуществляется оценка вероятности возникновения аварии трубопровода (табл. 5).

Такой подход к оценке остаточного ресурса трубопровода можно рассматривать как альтернативный или дополняющий обследование с помощью внутритрубных приборов, так как подробная информация о геометрии (толщинометрия, гофры, овальность и т. д.), получаемая при внутритрубных обследованиях, должна быть дополнена сведениями о реальном состоянии металла, локальных напряжениях, наличии поверхностных трещин.

В случае обнаружения на поверхности элемента трубопровода (участка линейной части,гиба или тройника) дефекта коррозионного происхождения проводится расчетное определение степени его опасности с позиций статической и циклической прочности.

В основе статического расчета лежит гипотеза, согласно которой влияние поверхностного коррозионного дефекта на прочность трубопровода аналогично влиянию одиночного сквозного отверстия. Приведение дефекта к одиночному сквозному отверстию осуществляется через его площадь, определяемую по сечению вдоль оси трубопровода, поскольку несущая способность трубопровода определяется кольцевыми напряжениями (рис. 2).

Расчет при циклическом нагружении основывается (наряду с эксплуатационной нагруженностью и циклическими свойствами материала) на данных о его НДС, в первую очередь, в зонах концентрации напряжений.

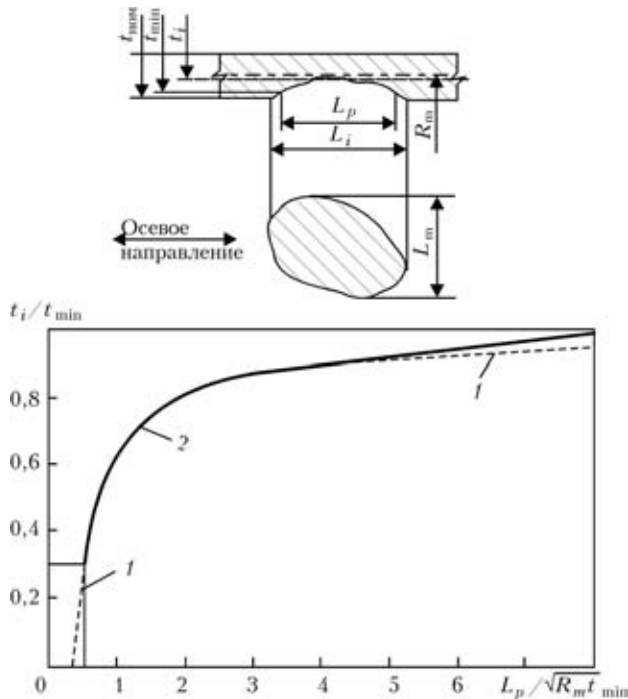


Рис. 2. Предельные размеры дефектов, не снижающие несущую способность трубы: 1 — теоретические значения предельных размеров дефекта; 2 — зависимость, предлагаемая для расчета

Таблица 5. Оценка вероятности аварий трубопровода в зависимости от остаточного ресурса

Остаточный ресурс, лет	Вероятность аварии
> 30	По существу невозможна
20...30	Потенциально возможна
10...20	Возможна в период эксплуатации
< 10	Могла бы произойти, если бы оборудование эксплуатировалось несколькими годами больше



Space - 3D

БИБЛИОТЕКА ОБЪЕКТОВ

ОБЪЕКТ	ТРУБА		ШТУЦЕР		ДЕФЕКТ		*	◀	▶	Удл	Угол	N_болтов
	поверхность											
	внт	нар	внт	нар	внт	нар						
тройник	cyt	cyt	cyt	cyt	-	-	x	-	-	90	-	
тройник	cyt	cop	cyt	cop	-	-	x	-	-	90	-	
тройник	cop	cop	cop	cop	-	-	x	-	-	90	-	
тройник	cyt	cyt	cyt	cyt	-	-	x	-	+	90	-	
тройник	cyt	cop	cyt	cop	-	-	x	-	-	90	-	
тройник	cop	cop	cop	cop	-	-	x	-	+	90	-	
тройник	cyt	cyt	cyt	cyt	-	-	x	-	-	90	-	
тройник	cop	cop	cop	cop	-	-	x	-	-	90	-	
тройник	cyt	cyt	cyt	cop	-	-	x	-	+	90	-	
тройник	cyt	cop	cyt	cop	-	-	x	-	+	90	-	
тройник	cop	cop	cop	cop	-	-	x	-	+	90	-	
труба	cyt	cyt	-	-	sph	-	-	x	-	-	-	
труба	cyt	cyt	-	-	sph	-	-	x	-	-	-	
труба	cyt	cyt	-	-	cyt	-	-	x	-	-	-	
отвод	tor	tor	-	-	-	-	x	-	+	any	-	
переходник	cyt	cyt	-	-	-	-	-	x	+	-	-	
труба	cyt	cyt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
фланец* 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	4	
фланец* 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	180	4	
фланец* 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	8	
фланец* 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	360	8	
фланец*12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	12	
фланец*12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	180	12	

OK Cancel

Рис. 3. Библиотека параметризованных моделей элементов трубопровода

Определение НДС в зоне повреждения в упругой области нагружения осуществляется методом конечных элементов (МКЭ). Метод реализуется в среде проблемно-ориентированного программного обеспечения SPACE-3D [10] определения НДС узлов трубопровода. Составляющей программного обеспечения являются средства, позволяющие на современном научном уровне выполнять многовариантные численные расчеты напряженного состояния элементов трубопроводов. При этом значительное внимание было уделено разработке инструментария построения геометрических моделей рассматриваемых объектов — библиотеки параметризованных моделей типовых элементов трубопроводов (рис. 3). Это позволяет на основе базовой строить новую модель,

задавая новые значения параметров, в качестве которых принимаются ее характерные параметры. Использование параметризованных моделей избавляет пользователя от рутинной работы по подготовке входных данных, описывающих геометрию объекта (рис. 4).

В качестве геометрической модели рассматриваемых поверхностных дефектов используется половина эллипсоида, осями симметрии которого являются наибольшие размеры дефекта в осевом, окружном и радиальном направлениях трубопровода (рис. 5).

Расчет местных максимальных упругопластических деформаций e_{aj}^{-k} выполняется на основе данных упругого расчета МКЭ и интерполяционного соотношения для коэффициентов концентрации:

$$e_{aj}^{-k} = K_{ej} \frac{e_{aj}}{e_T}$$

где e_{aj} — амплитуда номинальных деформаций в j -м цикле нагружения; e_T — интенсивность деформации, соответствующая пределу текучести; K_{ej} — коэффициент концентрации деформаций в упругопластической области деформирования материала в зоне дефекта в j -м цикле нагружения.

Результаты расчетов в статической и циклической постановке сопоставляются с данными расчета при равномерной коррозии и могут повлиять на выполненную ранее прогнозную оценку ресурса элемента, не учитывающую наличие де-

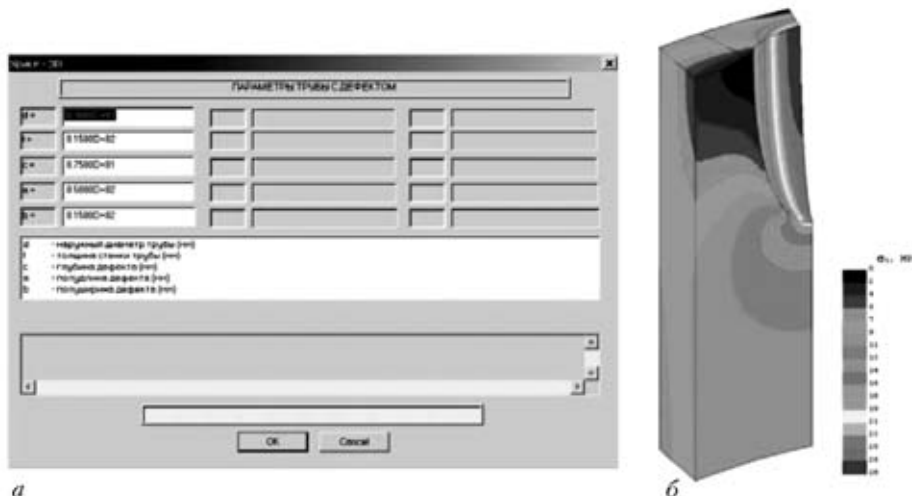


Рис. 4. Определение НДС трубы с дефектом: а — диалоговое окно для ввода данных; б — результаты расчета напряжений в зоне дефекта

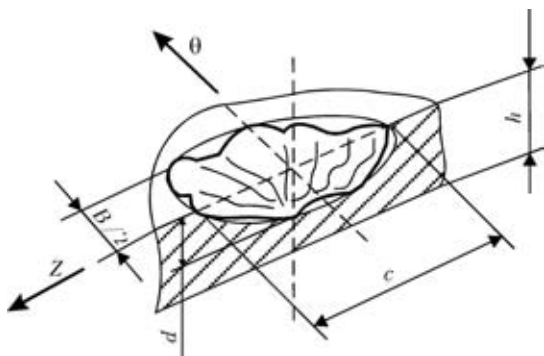


Рис. 5. Поверхностный дефект, моделируемый половиной эллипсоида: c — длина; b — ширина; d — глубина дефекта; h — толщина стенки трубы

фекта. Общая схема расчета остаточного ресурса представлена на рис. 6.

Используемые при расчете методики прошли экспериментальную проверку при испытаниях натурных образцов (рис. 7).

Многочисленными исследованиями, проведенными в последние десятилетия, доказано негативное влияние на целостность и функционирование трубопроводов просадок грунтов, оползней, карстовых и эрозионных процессов, подтопления, экстремальных ветровых нагрузок (для наземных участков) и т. д. [11, 12].

Большинство аварий трубопроводов в пределах Восточно-Европейской платформы происходит на контактах различных геоморфологических уровней (террас, поверхностей выравнивания), где значительно увеличивается коррозионная активность среды. Негативное влияние на техническое состояние линейных сооружений могут оказывать и так называемые энергоопасные зоны, формирующиеся на границе тектонических структур, характеризующихся различной неотектонической и современной тектонической активностью [13], а также морфоструктурные узлы, образующиеся в местах пересечения разнонаправленных тектонически активных разломов. В их пределах фиксируются повышение сейсмичности, а также скоростей и амплитуд медленных вертикальных движений земной коры, что в конечном итоге может вызывать изменение напряженного состояния трубопровода [14, 15].

Исходя из вышеизложенного, информация об основных параметрах литосферы включается в состав ГИС оценки технического состояния трубопровода в виде отдельного модуля, позволяющего оценить морфоструктурно-неотектонические условия в зоне прохождения трубопровода как в целом, так и по отдельным составным компонентам.

В наиболее общем виде структуру морфоструктурно-неотектонического модуля ГИС оценки технического состояния трубопровода можно представить в виде нескольких разделов:

- топографическая основа района исследований;

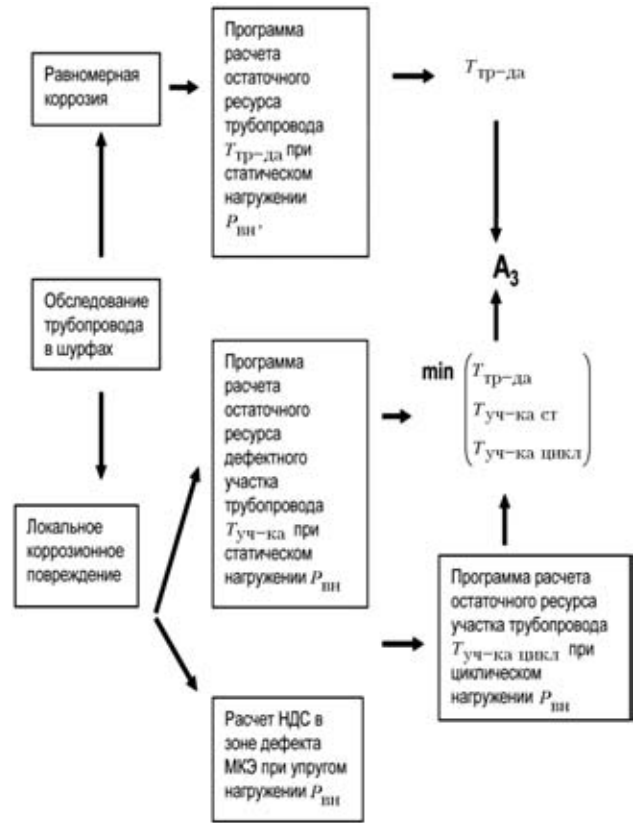


Рис. 6. Оценка риска аварии в зависимости от остаточного ресурса

- рельеф;
- геологические условия;
- неотектонические условия.

Усредненные значения активности площадных морфоструктур заносятся в базу данных. Учитывающая разноразмерность показателей, интегральная оценка проводится путем ранжирования каждого критерия по четырехбалльной шкале. В зависимости от суммы набранных баллов проводится морфоструктурное районирование исследуемой территории с выделением активных, умеренно активных, слабоактивных и неактивных структур.

Показатель геодинамической устойчивости территории является одним из критериев для ин-



Рис. 7. Натурный образец D325 после испытания до разрушения внутренним давлением

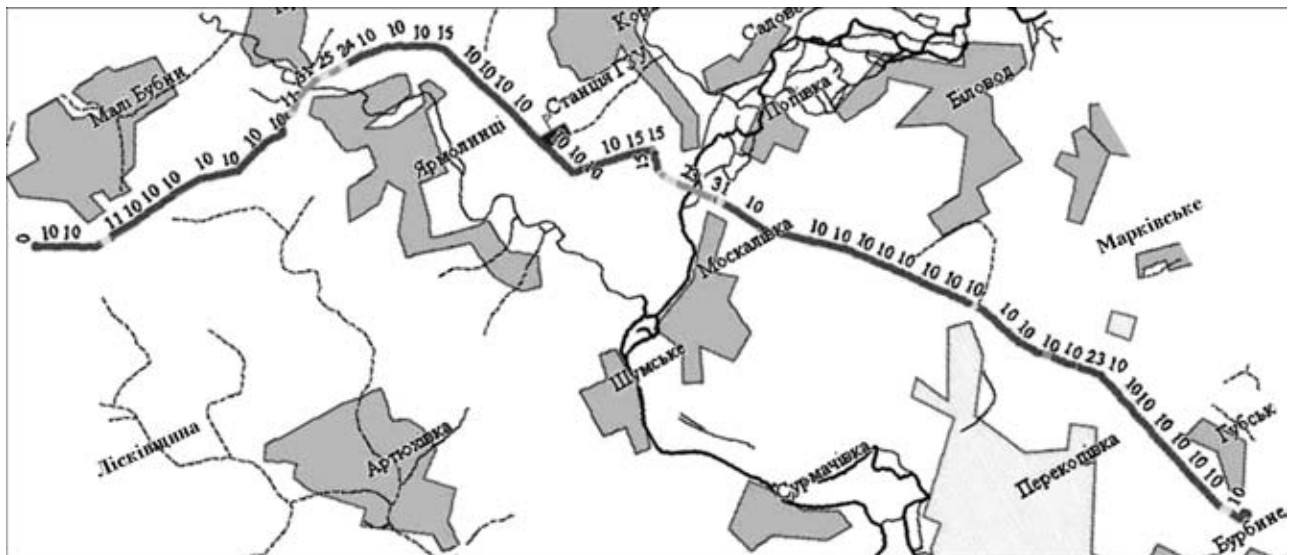


Рис. 8. Оценка риска аварии по критерию качества изоляционного покрытия (цифры — балльная оценка риска на участке трубопровода)

тегральной оценки технического состояния трубопровода.

Таким образом, отличительными особенностями разработанной ГИС является возможность оценки опасностей и риска аварий трубопровода с учетом:

прогнозирования остаточного ресурса на основе статистических методов обработки результатов обследования в шурфах;

оценки динамики приповерхностной части литосферы в районах пролегания трубопроводов;

определения НДС типовых элементов трубопроводов МКЭ, в том числе при наличии поверхностных нетрещиноподобных дефектов.

Разработанная ГИС предложена для практической реализации метода риск-менеджмента, основанного на оценке технического состояния трубопроводов и прогнозировании их остаточного ресурса. Система апробирована на данных обследования нефтепровода Ахтырского НГДУ (рис. 8).

Тестовый вариант ГИС позволяет определять возможность дальнейшей эксплуатации как отдельных участков, так и трубопровода в целом, назначать предупредительные и корректирующие действия, что является основой для повышения уровня безопасного функционирования реальных трубопроводов.

1. Кошкарёв А.Г. Картография и геоинформатика: пути взаимодействия // Изв. АН СССР. Сер. геогр. — 1990. — № 1. — С. 32–38.
2. Майорова О. В. Отказы и аварии на магистральных газопроводах: причины, следствия // Актуальные проблемы современной науки. — 2005. — № 2. — С. 118.
3. Инструкция по обследованию методом шурфования, испытаниям и оценке ресурса линейной части подземных

магистральных трубопроводов (И1-98 ИЭС им. Е. О. Патона). — 72 с.

4. СТП 3209.30019801.084–2003. Магістральні трубопроводи. Вимоги до обсягу збору даних для наповнення системи паспортизації магістральних газопроводів. — Київ: ДК «Укртрансгаз», 2003. — 36 с.
5. GROWTH Project GIRD-CT-2001-03008 «RIMAP», Document number: 1-11-F-2004-01-1.
6. СНУП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988 — 52 с.
7. Sutton, Ian S. Process Hazards Analysis. Sutton Books, Houston, Texas. 2002. — С.310.
8. ДСТУ 4046–2001. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. — Київ: Держстандарт України, 2001. — 24 с.
9. Методика оцінки технічного стану металу діючого газопроводу з тривалим строком експлуатації та залишкового ресурсу його безпечної роботи Укрндігаз, 1997.
10. Програмне забезпечення «Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE) / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04. — 2004.
11. Говдяк Р. М. Удосконалення технологічного проектування нафтогазопроводів з урахуванням їх взаємодії з довкіллям:— Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Івано-Франківськ, 2002. — 21 с.
12. Захаров Ю. Ф. Инженерно-геологический мониторинг природно-техногенных систем (на примере Западно-Сибирского нефтегазового комплекса): Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. — М., 1988. — 43 с.
13. Худяков Г. И. Энергоопасные зоны и трансрегиональные трубопроводы / Проблемы экологической геоморфологии: Материалы Межгосударственного совещания XXV Пленума геоморфологической комиссии РАН. — Белгород: БелГУ, 2000. — С. 79–80.
14. Сучасні рухи земної кори на території України: проблеми тектонічної інтерпретації та картографування / А. В. Кендзера, В. Д. Омельченко, А. Л. Бондарь та ін. // Геоінформатика, 2003. — № 4. — С. 66–73.
15. Палиєнко В. П. Новейшая геодинамика и ее отражение в рельефе Украины. — Київ: Наук. думка, 1992. — 116 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Ин-т географии НАН Украины, Киев

Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, НГДУ «Ахтырканефтегаз»

Поступила в редакцию

18.01.2007