

УДК 622.692.4

С.Е.Кутуков, С.В. Павлов

*Уфимский государственный нефтяной технический университет,
НИИБЖД при МЧС РБ*

ИМИТАЦИОННЫЙ МЕТОД РАНЖИРОВАНИЯ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДА ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ

ВВЕДЕНИЕ

Длительный срок эксплуатации и повышение требований к экологической безопасности объектов нефтепроводного транспорта ставят в ряд важнейших задач эксплуатации нефтепроводов вопросы обеспечения надёжной и безотказной работы, предупреждения и снижения количества аварийных ситуации, разработки эффективных методов ликвидации последствий аварий. Приведенный перечень проблем принято объединять понятием "мониторинг".

Мониторинг надежности магистральных трубопроводов включает в себя целый ряд ключевых проблем, решение которых находится на различной стадии разработки.

Контроль технического состояния в настоящее время развивается весьма успешно. В трубопроводном транспорте нашли широкое применение такие методы тестового диагностирования состояния стенки трубопровода как: пропуск специальных внутритрубных снарядов ("Калипер", "Ультраскан" "Лайналог", "Ось-МТ" и др.), наружные методы непосредственного контроля: магнитная, вихретоковая, радиоволновая, радиационная дефектоскопия и акустическая эмиссия, а так же электрическая и тепловая дефектоскопия для контроля трубной изоляции.

Вопросы и технические средства оперативной диагностики утечек успешно разрабатываются специалистами АО «Сибнефтепровод» [1], ТОО «Энергоавтоматика», фирм АВВ (Германия), Combit АВ и Controlotron (Швеция) [2]. Канадские фирмы "Enbridge Pipelines Inc." и "Iconic Inc." разрабатывают стандарты АРІ для широкого внедрения автоматизированных систем диагностирования утечек по всему миру [3].

Оценка последствий происшедших аварий – наиболее продвинутая стадия в отечественных исследованиях данной проблемы. Результаты многочисленных исследований нашли свое воплощение в "Методике определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных трубопроводах" [4], разработанной сотрудниками ИПТЭР.

Достижения в решении проблемы прогнозирования экологических и социальных последствий аварий и связанных с ней вопросов обслуживания трубопроводов значительно скромнее - методология прогностических средств находится лишь в начальной стадии своего становления. Одной из многочисленных приложений данной проблемы является фрагментация

трубопровода на линейные объекты по экологическому признаку для ранжирования участков магистрального трубопровода как по их техническому состоянию, так и по возможным экологическим и социальным последствиям аварий. От корректности решения этой проблемы зависит уровень рационального планирования капитального ремонта линейной части магистральных трубопроводов (МТП), декларирования промышленной и экологической безопасности его объектов, разработки обоснованных нормативов для аварийных служб ЛПДС и т.д.

Решение задач прогноза возможно лишь с применением современной аппаратной и методологической базы геоинформационного моделирования.

ПРОГРАММНО - ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДА

Географической информационной системой или геоинформационной системой (ГИС) называют компьютерную систему, предназначенную для сбора, передачи, хранения, обработки и представления конечному пользователю территориально (или пространственно) привязанных данных. Она содержит пространственно-ориентированные данные в виде цифровых электронных карт различных масштабов и тематической нагрузки, а также средства их обработки и представления. В основу ГИС - технологий положена идея совместной компьютерной обработки картографического материала в виде электронных карт и атрибутивной информации, характеризующей объекты этих карт, в нашем случае - объекты магистрального транспорта для количественного и качественного контроля и анализа их состояния.

Послойно-тематический аспект является основой семантического структурирования информации в ГИС. При этом однотипные объекты электронной карты хранятся в определенной файловой структуре, называемом покрытием или слоем электронной карты. Примером различных слоев электронной карты могут быть: дорожная сеть, речная сеть, населенные пункты, линейная часть трубопровода и др.

Хранящиеся в базах данных ГИС данные могут использоваться как для просмотра и отображения, так и для организации сложных тематических запросов, расчетов, и моделирования различных ситуаций.

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙ

Первым шагом моделирования последствий разливов нефти из поврежденного трубопровода и разработки на их основе прогнозов развития аварийных ситуаций является построение 3-х мерной модели гидрологически корректной решетки рельефа. Решетка рельефа является основой для решения гидрологических задач анализа поведения жидких субстанций при их движении по рельефу местности под действием силы тяжести. В качестве жидких субстанций может подразумеваться не только жидкости в обычном понимании, но и газы тяжелее воздуха.

Исходная географическая информация представляет собой электронную карту прямоугольной ячеистой структуры $N \times M$ ячеек. В каждую ячейку $h(i,j)$ записывается значение абсолютной высоты рельефа местности в центре ячейки.

Размеры всех ячеек решетки одинаковы и определяются точностью требуемых результатов и исходных данных. В качестве дополнительных данных для построения решетки рельефа целесообразно использовать объекты электронной карты: изолинии рельефа; точечные отметки высот и урезов воды; гидрографическую сеть. На линейной части трубопровода в пересечении с границами ячеек географической карты выделяются сечения, через которые проводятся линии в направлении наиболее сильного понижения рельефа - кратчайшего спуска (максимальных градиентов высотных отметок). В геоинформационных системах линии обязательно имеют параметр "направление". Эти направления естественно замыкаются гидрографической сетью, определяющей градиенты рельефа (так как реки текут всегда в сторону понижения высоты рельефа). Полученные координатные линии также определяют наиболее вероятные маршруты при течении жидкости через ячейки исходной электронной карты.

Другим семейством координатных кривых являются изолинии рельефа.

Для вычисления недостающих значений гидрологически корректной решетки рельефа применены интерполяционные функции, использующие значения изолиний рельефа, отметок высот и направления течения рек, ручьев и пр. Результат определения маршрута стекания представлен на рис. 1.

Полученная таким образом 3-х мерная модель гидрологически корректной решетки рельефа, состоящая из двух координатных семейств – линий максимальных градиентов и изолиний рельефа, является основой для разработки прогнозов развития аварийных ситуаций на трассах трубопроводов.

Решетка рельефа для определения маршрута стекания аварийных сбросов на участке нефтепровода Тумазы-Уфа-2

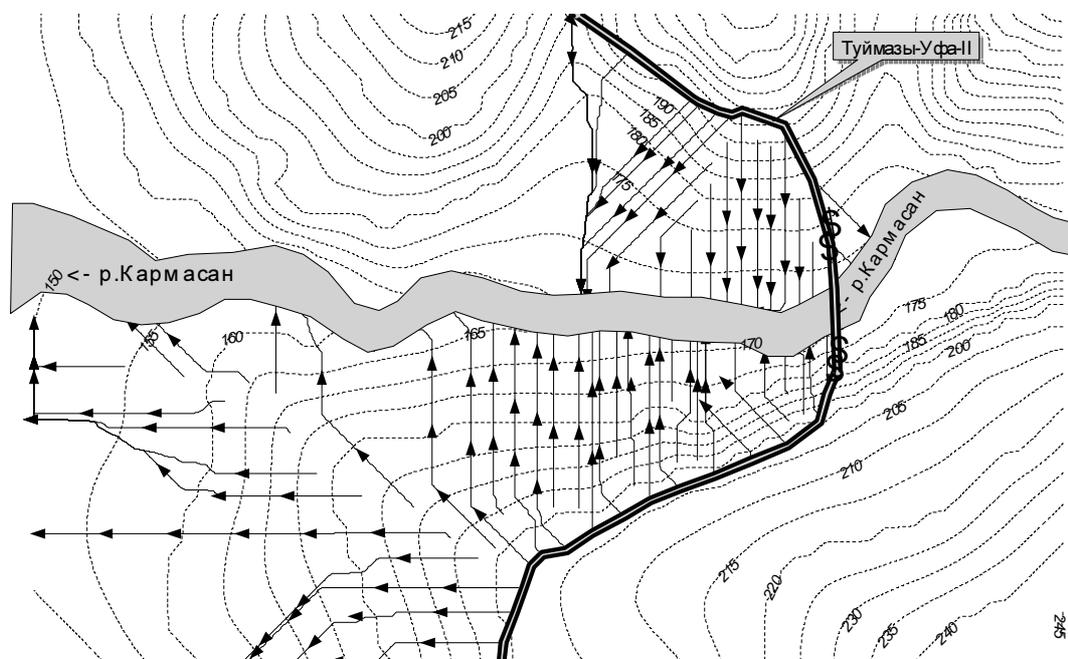


Рис.1

Следует отметить, что реализация вышеперечисленных работ пока возможна только на RISC платформе рабочих станций, например, типа Sun Sparc Station и программного обеспечения ГИС ARC/INFO версии 7.0 и выше, что продиктовано прежде всего большим объемом обрабатываемой промежуточной информации, а также использования цифровой карты местности достаточно подробного масштаба.

Вторым шагом разработки прогнозов является определение шлейфа возможных загрязнений и аккумулирующей способности элементов экосистемы по решетке рельефа. Направление и маршруты стекания аварийных сбросов нефти определены семейством координатных линий кратчайшего спуска. Однако, ширина шлейфа загрязнений зависит как от интенсивности аварийного выброса, времени истечения и реологических свойств нефти, так и от уклона местности по координатной линии, сорбционных свойств почвенного слоя и растительного (снежного) покрова.

Явно неустановившееся движение нефти по рельефу местности описывается уравнением неразрывности с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\rho_{\text{нефти}} \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{dh}{dt} n_e \cdot \rho_{\text{гр}} + q = 0, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{нефти}}$, $\rho_{\text{гр}}$ – плотность нефти и грунта, кг/м³;

h – глубина пенетрации нефти в грунт, определяемая по уравнению диффузии [5];

n_e – нефтеёмкость грунта, по "Методике расчета выбросов вредных веществ...", Самара, 1996 рекомендовано брать 0,04 м³/м³;

q – удельный выброс углеводородов в атмосферу, по "Методике по определению выбросов вредных веществ в атмосферу на предприятиях РСФСР, Астрахань, 1998, для случая испарения со свободной поверхности принимаем 3,158 г/(м²·ч);

V – скорость течения нефти по направлению линии кратчайшего спуска, определяемая по уравнению Шези [5]:

$$V = C \cdot \sqrt{R_h \cdot i_0}, \quad (2)$$

где C – коэффициент Шези, зависящий от свойств поверхности грунта и растительного (снежного) покрова [5];

R_h – гидравлический радиус потока нефти, определяющий ширину шлейфа загрязнений, м;

i_0 – уклон рельефа местности.

Данная система уравнений решена методом конечных элементов с разбиением расчетной области согласно исходной географической информации на электронной карте прямоугольной ячеистой структуры. Ямы, амбары, дамбы и пр. увеличивают аккумулирующую способность ячейки за счет накопления свободной нефти в пониженных местах микрорельефа. Замкнутые изолинии рельефа с направлением внутрь этих зон линий максимальных градиентов достаточно точно описывают специфику рельефа и позволяют геометрически оценить емкость таких понижений.

Однако, исходная информация о свойствах почвенного слоя и растительного (снежного) покровов, а так же микрорельеф местности и ситуационная обстановка подвержены сезонным и многолетним изменениям.

В связи с тем, что фактическое состояние местности в окрестности трубопровода изменяется чаще, чем происходит обновление топографических карт (1 раз в 10-20 лет), используемых при построении ГИМ, возникает необходимость использования методов и средств дистанционного зондирования поверхности Земли из космоса.

Дистанционное зондирование Земли, осуществляемое спутниковыми системами наблюдения, открывает широкие перспективы для решения задач геоинформационного моделирования. К настоящему времени накоплен богатый опыт использования космических данных для уточнения географического положения естественных и техногенных объектов, их внутреннего состояния, включая экологические аспекты, корректировки топографических карт.

По степени пространственной генерализации информации можно выделить:

космические данные глобального масштаба, имеющие пространственное разрешение ~ 1 км и соответствующие картам масштаба $\sim 1:2500000$ (спутники NOAA, Метеор, Океан);

космические данные регионального масштаба, имеющие пространственное разрешение ~ 100 м и соответствующие картам масштаба $\sim 1:250000$ (спутник «Ресурс 01», сканер МСУ-СК);

космические данные локального масштаба с пространственным разрешением $\sim n \times 10$ м, соответствующие картам масштаба $1:n \times 25000$, где $1 \leq n \leq 10$ (спутники «Ресурс Ф», «Ресурс 01» сканер МСУ-Э, Landsat, Spot, IRS, JERS, ERS, Radarsat, аэросъемка).

Реализация процесса геоинформационного моделирования, представляющего собой синтез космической и картографической информации была опробована на примере трассы действующего трубопровода. В качестве космической информации использовались данные дистанционного зондирования с пространственным разрешением 160 м, которые позволяют оценить обстановку в районе места расположения нефтепровода Туймазы-Уфа. На модели хорошо видно, что некоторые географические объекты (населенные пункты, водохранилища, границы лесных зон) значительно изменили свое положение, что оказывает существенное значение при оценке возможного отрицательного воздействия от аварий на трубопроводе для населения и окружающей среды.

Третий этап анализа потенциальной опасности загрязнений заключается в разбиении трассы трубопровода на линейные объекты и сравнительной оценке объемов аварийных сбросов нефти из каждого такого объекта.

При попадании нефти в любой водный объект экологический ущерб и площадь загрязнений значительно возрастают. Поэтому целесообразно деление трассы трубопровода на участки (линейные объекты), из которых аварийные сбросы попадают в один и тот же водный объект.

Основная проблема построения алгоритма ранжирования участков трассы магистрального трубопровода, пригодного для дальнейшего приложения на

ЭВМ, заключается в количественной оценке риска загрязнения окружающей среды. С некоторыми допущениями ее можно свести к относительной оценке вероятности возникновения аварийной ситуации на том или ином участке трассы и загрязнении важных природных, коммунальных или промышленно-административных объектов.

Задача ранжирования участков трубопровода по экологическому риску базируется на сопоставлении последствий аварийных ситуаций на различных участках трассы трубопровода при "равных" условиях ее развития. Под "равными" будем понимать условия возникновения аварийной ситуации (сценарий со среднестатистическим временем идентификации аварии и закрытия задвижек по трассе по 2,5 часа), а так же "эквивалентные" размеры аварийных отверстий. Применяя методы приведения различных конфигураций отверстий и рассматривая произведение их площадей на соответствующие коэффициенты истечения ($\mu \cdot f_0$), можно унифицировать оценки большого числа разнообразных факторов, влияющих на объем истечения, таких как: условия формирования струи и форма отверстия, физические свойства нефти и окружающей среды, напор и скорость истечения и пр. "Эквивалентный" диаметр аварийного отверстия определим из выражения:

$$\mu \cdot f_0 = \pi \cdot d^2/4 \text{ или } d = 2 \cdot \sqrt{(\mu \cdot f_0/\pi)}, \quad (3)$$

где μ - коэффициент истечения через аварийное отверстие [4];
 f_0 - площадь аварийного отверстия, м².

Диапазон диаметров целесообразно ограничить 2 см, т.к. при больших размерах отверстий аварийный сброс нефти будет превышать 10...15% плановой производительности трубопровода, что подразумевает другой сценарий развития аварийной ситуации.

Оценку объема истечения производим по "наихудшему" случаю – точки образующей трубопровода с минимальной высотной отметкой для каждого участка трубопровода. Расчетная схема определена тремя характерными этапами развития аварийно ситуации:

1. Истечение нефти под рабочим давлением на участке трубопровода определяется временем с момента разгерметизации трубопровода до момента идентификации аварийной ситуации и отключения насосной станции ($\tau = 2,5$ часа).

$$V_1 = \mu \cdot f_0 \cdot \tau \sqrt{2gH_H}, \quad (4)$$

где H_H – напор процесса истечения, определяемый как расстояние от точки истечения до линии гидравлических уклонов трубопровода в плановом режиме его эксплуатации.

2. Истечение нефти при переменном напоре определяется временем закрытия задвижек ($\tau = 2,5$ часа):

$$V_2 = \mu \cdot f_0 \cdot \tau (\sqrt{2gH_H} + \sqrt{2gH_K})/2, \quad (5)$$

где H_K – гидростатический напор, определяемый как разница высотной отметки наивысшей точки трубопровода на участке трассы между двумя перекрытыми задвижками и отметки места слива.

3. Истечение нефти из заглушенного трубопровода (V_3) определяется объемом опорожнения трубы с учетом защемленной нефти в

"застойных" по рельефу местности участках трубопровода и давлением насыщенных паров нефти, удерживающим гидростатический столб нефти над отверстием:

$$H_{ст} = (P_{атм} - P_s) / \rho g. \quad (6)$$

Итоговый объем вытекшей нефти можно оценить как сумму объемов истечения на каждом этапе. Характерное соотношение объемов аварийных сбросов нефти в окружающую среду в зависимости от эквивалентного размера отверстия в характерных сечениях трубопровода показано на рис. 2.

Объемы аварийных утечек нефти на участке № 21 трассы ТУ-2
НПС Языково-Нурлино

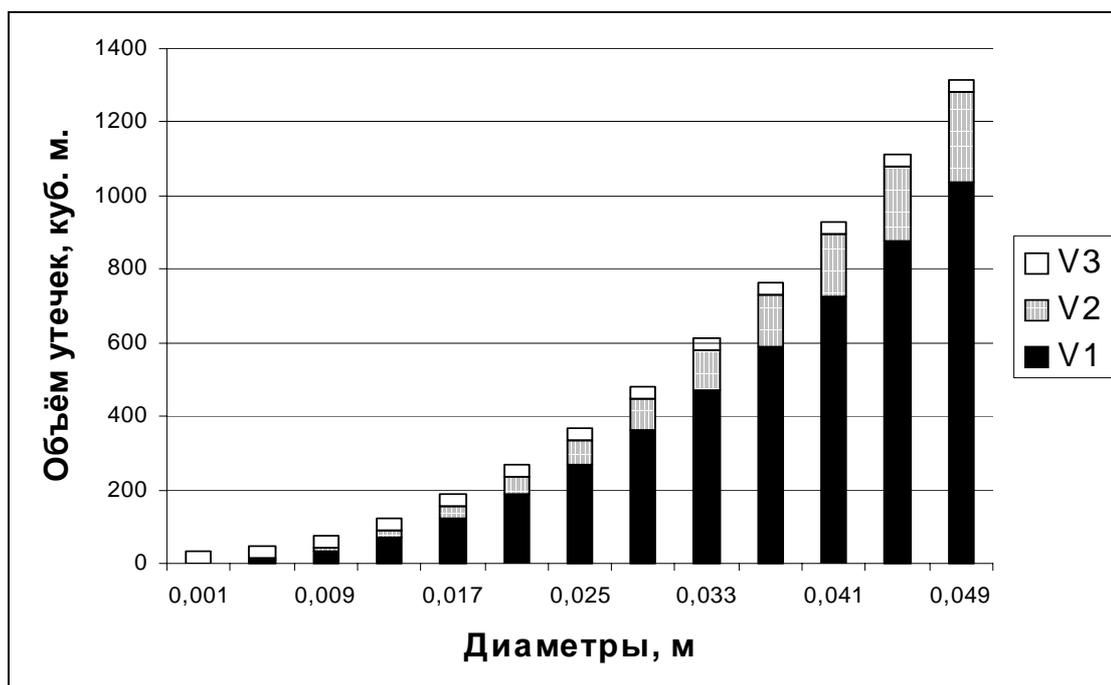


Рис.2

Для "малых" отверстий $\varnothing \approx 1$ мм практически весь объем аварийного слива определяется объемом опорожняемой трубы, время истечения которого весьма велико, если не применять таких технологий ремонта как врезка катушки. При объемах истечения меньших 10т такая ситуация вообще не идентифицируется как аварийная. Однако, обнаружение таких дефектов требует большого времени и специальных методов, поэтому время слива под рабочим давлением может быть многим большим 2,5 часов.

Для "больших" отверстий $\varnothing > 2$ мм выход нефти на дневную поверхность будет явным и быстрым. Объемы опорожнения трубы пренебрежимо малы. Основная масса продукта вытечет на первом этапе, и будет определяться напором сечения с аварийным отверстием в рабочем режиме эксплуатации трубопровода.

Распределение аварийных сбросов по длине участка трубопровода Туймазы-Уфа-2 между НПС Языково и Нурлино через аварийные отверстия эквивалентного $\varnothing 0.01$ м приведены на рис. 3.

Распределение аварийных сбросов через отверстия $\varnothing 1$ см по длине участка трубопровода Туймазы-Уфа-2 между НПС Языково и Нурлино

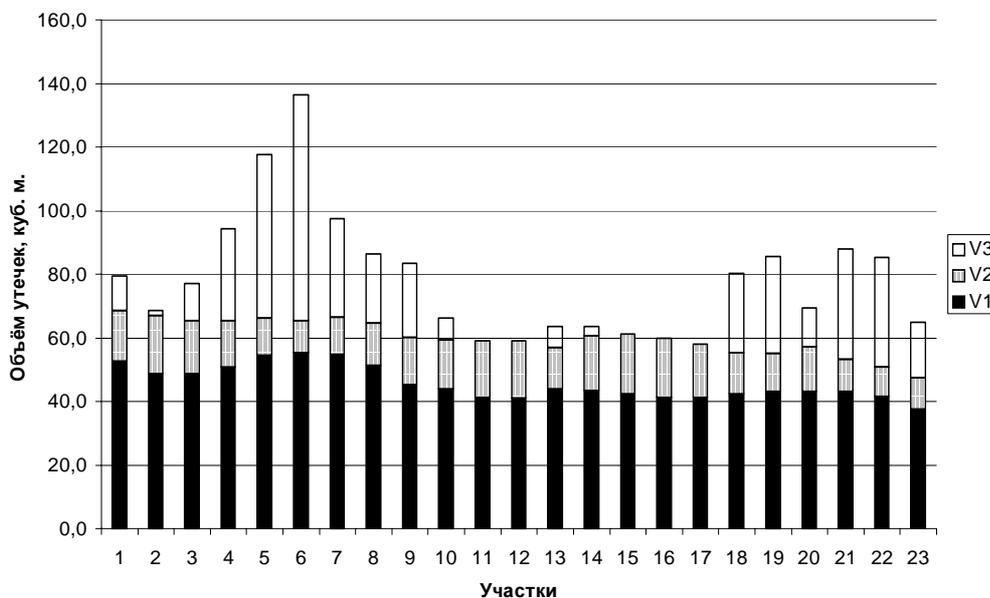


Рис.3

Аналогичные расчеты были произведены для статистически обоснованного ряда диаметров аварийных отверстий.

Объем аварийного сброса нефти в реку был оценен моделированием аварийной ситуации по вышеприведенному сценарию. Предполагая, что величина экологического ущерба пропорциональна объемам аварийных утечек, загрязняющих водоемы, введем в рассмотрение параметр μ_1 , как относительную величину потенциального ущерба:

$$\mu_{1i} = V_{\Sigma i} / V_{\Sigma \max}, \quad (7)$$

где i – индекс участка трассы;

$V_{\Sigma \max}$ – максимальная величина потенциальных аварийных сбросов в реку на участке НПС Языково-Нурлино.

Результат ранжирования по экологическим последствиям аварийной ситуации представлены в табл.

Таблица

Таблица приоритетов на участке трассы Туймазы-Уфа-2
между НПС Языково и Нурлино

№ Уч-ка	Название водного объекта	Ранг участка
6	Батмак – Кармасан	1,000
5	Б.Н. – Батмак – Кармасан	0,862
7	Кармасан	0,714
4	Б.Н. – Батмак – Кармасан	0,691
21	Сартовка – Кармасан	0,644
8	Кармасан	0,632
19	Б.Н. – Потоки – Кармасан	0,627
22	Шемяк – Кармасан	0,625
9	Б.Н. – Кармасан	0,611
18	Б.Н. – Табулдак – Кармасан	0,588
1	Б.Н. – Санны – Кармасан	0,583
3	Б.Н. – Б.Н. – Чермасан	0,564
20	Б.Н. – Потоки – Кармасан	0,508
2	Б.Н. -.Б.Н. – Чермасан	0,503
10	Б.Н. – Кармасан	0,485
23	Б.Н. – Сикиязка – Кармасан	0,476
13	Табулдак – Кармасан	0,467
14	Уза – Дема	0,466
15	Уза – Дема	0,448
16	Б.Н. – Табулдак – Кармасан	0,438
11	Табулдак – Кармасан	0,433
12	Уза – Дема	0,432
17	Уза – Дема	0,425

Несмотря на то, что вклад каждого из действующих факторов в итоговый сброс значительно зависит от величины аварийного отверстия, результат ранжирования участков трассы в большей своей части (на 87%) предопределен положением конкретного сечения трубопровода в рельефе местности.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Прогнозирование последствий аварийных ситуаций на трассе – ключевая проблема мониторинга надежности магистральных трубопроводов, решение которой возможно лишь с применением развитых систем обработки, хранения и отображения картографической информации (ГИС).
2. Основной принцип фрагментации линейной части магистрального трубопровода для дальнейшего анализа – экологический, по водоразделам водных объектов, пересекаемых трассой.
3. Достоверность экологического прогноза зависит в равной мере как от методологической базы геоинформационного моделирования, так и от детализированности предложенного сценария развития аварийной ситуации. В случае неопределенности основных параметров аварии целесообразно использовать сравнительные оценки (ранги) в анализе достаточности уровня надежности того или иного участка магистрального трубопровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лосенков А.С., Трефилов А.Г., Нархов В.П. и др. // Трубопроводный транспорт нефти. 1996. № 11.– с.7-10.
2. Прохоров Б.М. // Трубопроводный транспорт нефти. № 11, 1996. – с.32-34.
3. Don M. Scott // Oil&Gas J. 1999. # 11. – p.51-57.
4. "Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных трубопроводах"(утв. Минтопэнерго РФ 1 ноября 1995г.)- Уфа: ИПТЭР, 1995.
5. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы / Т.М. Башта и др. - М.: Машиностроение, 1977. - 504 с.