

ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ГЕОСИСТЕМЫ

УДК 629.11.011.38

КОНЦЕПЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕФТЕПРОВОДОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ АВАРИЯХ

*канд. техн. наук, доц. В.К. ЛИПСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

С позиций системного подхода изложена концепция моделирования воздействия магистральных нефтепроводов на окружающую среду при авариях, учитывающая разнородный характер природы факторов, влияющих на развитие аварий и их последствия. Рассмотрены пути создания различных моделей, предназначенных для использования при достижении разных целей исследования.

Введение. Наиболее серьёзной проблемой, с точки зрения обеспечения экологической безопасности магистрального трубопроводного транспорта нефти, является загрязнение окружающей среды при авариях на магистральных нефтепроводах. Изучение этой проблемы и её решение в силу сложности и многофакторности процессов, из которых состоит взаимодействие нефтепровода с окружающей средой при его аварии, вызывает значительные трудности. Для того чтобы явление аварии могло стать объектом изучения и управления, необходимо создать его адекватное отображение, т.е. модель.

Характер развития и последствия аварии зависят от очень большого количества факторов. На начальном этапе исследования эти факторы выявляются, а затем описываются вербально. Этап изучения действующих факторов является необходимым этапом любого моделирования. Он осуществляется на основе анализа реальной ситуации и присутствует при построении моделей любого вида.

Характерное сравнение в данном случае можно сделать с использованием метода теории размерностей для построения модели физического процесса или явления [1, 2]. В этом случае выбор параметров основывается на изучении физической сути явления, а от полноты и достаточности учёта этих параметров зависит адекватность модели. При этом рассматривается целесообразность введения в зависимость каждого из действующих параметров с точки зрения степени его влияния на рассматриваемый процесс. Все рассматриваемые параметры однозначно представляют собой величины, имеющие количественный эквивалент, представленный определённой физической размерностью. После выбора всех параметров на базе 71-теоремы устанавливается количественная зависимость между рассматриваемыми параметрами, которая и является моделью изучаемого процесса.

Авария на магистральных нефтепроводах (МНП) по количеству и характеру действующих параметров является неизмеримо более сложным явлением, чем отдельный физический процесс, и в этом случае, безусловно, начальный этап создания модели этого явления состоит в его изучении и выявлении факторов, влияющих на него.

Этот этап в известной мере уже выполнен [3] и выявлены основные факторы, влияющие на явление аварии. Анализ этих факторов показал, что они имеют различную природу и в большинстве случаев не могут быть охарактеризованы количественно с помощью физических величин. Многие из них могут быть описаны только вербально. Это создаёт основную трудность в построении модели аварии, состоящую в выборе и применении методов количественного описания действующих параметров. Отсюда вытекает одна из важнейших задач при создании модели аварии - нахождение методов квантификации многочисленных и разнородных факторов, влияющих на развитие аварии.

Не менее важной проблемой является формализация представления последствий аварий. Если говорить об экологических последствиях, то они могут быть представлены различным образом: через описание состояния экологических параметров компонентов геосферы; через оценку непосредственных и отдалённых последствий, которые проявляются в результате аварий; в виде определённых комплексных показателей экологического состояния территории; в виде экономического ущерба от негативного воздействия техногенеза на окружающую среду. В зависимости от того, для какой цели необходимо выразить последствия воздействия техногенеза (в нашем случае воздействие техногенеза - залповый сброс нефти), целесообразно использовать ту или иную формы оценки последствий аварий.

В работе [3] указывается, что *опасность загрязнения окружающей среды (в частности, водных объектов) нефтью при авариях на нефтепроводах создаёт проблемную ситуацию*. Эта исходная формулировка рассмотрена как модель реальной проблемной ситуации и представлена как система. Граф структурной схемы проблемы загрязнения окружающей среды (водных объектов) при авариях на ма-

гастральных нефтепроводах (модель «белый ящик») заимствован из работы [3] и представлен в более компактном виде (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема системы проблемы загрязнения окружающей среды (водных объектов) при авариях на магистральных нефтепроводах

Проведенное в [3] структурирование исходной проблемы позволило определить основные компоненты системы и описать логическую структуру взаимодействия между этими компонентами.

Цель решения проблемы загрязнения водных объектов при авариях на магистральных нефтепроводах - минимизация ущерба, следовательно, естественным является то, что «выходом» предложенной модели служит подсистема экологических, экономических и социальных последствий загрязнения водных объектов нефтью. Характеристики подсистемы последствий формируются под воздействием всех остальных элементов системы. Модель структуры даёт возможность выделять элементы системы, которые оказывают влияние на «выход», т.е. последствия аварии.

Назначение модели. Модель структурной схемы проблемы загрязнения окружающей среды при авариях на магистральных нефтепроводах одновременно является моделью реальной ситуации взаимодействия магистральных нефтепроводов с окружающей средой при авариях [3, 4]. В соответствии с представлениями, изложенными в [5], это взаимодействие осуществляется в рамках единой природно-технической геосистемы (ПТГ) или геотехнической системы [6].

Рассматриваемая нами модель является структурной схемой взаимодействия магистральных нефтепроводов с окружающей средой при авариях (*модель аварии*). Эта модель может быть использована как для формализации описания *реальных аварий*, так и для прогнозирования ожидаемых последствий *возможных аварий*.

При определении назначения модели следует исходить из известного положения о том, что «модель является не просто образом - заместителем оригинала, не вообще каким-то отображением, а отображением целевым. Из того, что модель является целевым отображением, с очевидностью следует множественность моделей одного и того же объекта: для разных целей обычно требуются разные модели» [4, с. 36]. Из этого следует необходимость множественности моделей аварии, так как для достижения разных целей, которые на определённом этапе состоят в решении задачи, направленном на достижение целей более высокого уровня иерархии, требуются разные модели. Следовательно, для достижения каждой из указанных целей необходимо разработать соответствующий вид модели (рис. 2). Цели, для достижения которых должны использоваться различные модели, можно объединить по таким направлениям [7]:

1. Описание функционирования системы.
2. Прогноз функционирования системы при различных воздействиях.
3. Оптимизация функционирования системы.

Описание функционирования системы является первоочередной целью модели, достижение которой необходимо для достижения целей более высокого иерархического уровня: прогноза и оптимизации функционирования системы. Следует подчеркнуть, что речь может идти не о всеобъемлющем описании системы, а об описании только в рамках уже сформулированной проблемы, т.е. определённых аспектах функционирования системы. Модель, описывающая механизм функционирования системы, изложена в работе [3], где она представлена в вербальной форме и в виде блок-схемы (см. рис. 1). Описание функционирования системы, изложенное в этой концептуальной модели, явилось базой для создания моделей, направленных на достижения целей более высокого порядка.

Создание прогнозных моделей направлено на предсказание поведения системы в будущем под воздействием различных факторов, оказывающих влияние на функционирование системы.

Оптимизация (поиск наилучшего варианта функционирования системы) в первую очередь требует создание таких моделей, которые бы содержали критерий, характеризующий с оправданной степенью обобщения деятельность системы в рамках сформулированной проблемы. По этому критерию (критерий оптимальности) необходимо сравнивать разные варианты, определяя наилучший. На этапе оптимизации цель работы состоит в нахождении множества управляющих воздействий (факторов влияния), при которых критерий достигает экстремального воздействия.

Модели, создаваемые для решения каждой из указанных задач, должны в той или иной степени, в зависимости от поставленной цели, включать в себя элементы (подсистемы), входящие в состав структурной схемы системы проблемы загрязнения окружающей среды (водных объектов) при авариях на магистральных нефтепроводах - модели аварии (см. рис. 1).

Оценка экологических последствий реальных аварий. Следует отметить, что при авариях на нефтепроводах основные последствия проявляются в экологической сфере [8, 9, 10]. Поэтому в дальнейшем для того, чтобы не расширять и так достаточно обширную область изучаемых вопросов, мы ограничимся рассмотрением только экологических последствий. При необходимости, предложенные подходы могут быть адаптированы и для использования при оценке последствий в экономической и социальной сферах.

Если говорить об экологических последствиях (подсистема последствий, см. рис. 1), то они могут быть оценены как в натуральных, так и в обобщённых показателях, которые определяются различными, достаточно сложными и далеко не всеобъемлющими методами [5, 11 - 14]. Формы проявления экологических последствий очень многообразны, трудно поддаются изучению и ещё более трудно описываются количественно в обобщённом виде.

Экологические последствия можно представить как изменения экологической обстановки в природно-технических геосистемах, которые происходят под воздействием техногенных факторов $\Omega \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \right)$ на компоненты природы «А», «G», «L», «F», «Fn», «Hs» [6]. Формирование природно-технической геосистемы обусловлено переходом множества $\{e_0\}$ в $\{e_{ПТГ}\}$, т.е.

$$\begin{aligned}
 & e_0 \left\{ \sum_{i=1}^n e_{A_i}; \sum_{i=1}^n e_{G_i}; \sum_{i=1}^n e_{L_i}; \sum_{i=1}^n e_{F_i}; \sum_{i=1}^n e_{Fn_i}; \sum_{i=1}^n e_{Hs_i}; \right\} \rightarrow \\
 & \rightarrow e_{ПТГ} \left\{ \sum_{i=1}^n e_{A_i}; \sum_{i=1}^n e_{G_i}; \sum_{i=1}^n e_{L_i}; \sum_{i=1}^n e_{F_i}; \sum_{i=1}^n e_{Fn_i}; \sum_{i=1}^n e_{Hs_i}; \right\},
 \end{aligned} \tag{1}$$

выражающим техногенный эффект влияния трудовой деятельности человека на объекты природы. Многофакторный характер развития указанного перехода и неоднозначность внутренних связей типа $\omega_i \rightarrow e_i$; $\omega_{i-1} \rightarrow \omega_i$; $e_{i-1} \rightarrow e_i$; $\omega_i \rightarrow e_A \rightarrow e_G$; $e_A \rightarrow e_{F_i} \rightarrow e_{Fn}$, и т.д. не позволяет на современном этапе находить точные аналитические решения по комплексной оценке и прогнозированию интегральных характеристик $e_{ПТГ}(t)$ [6].

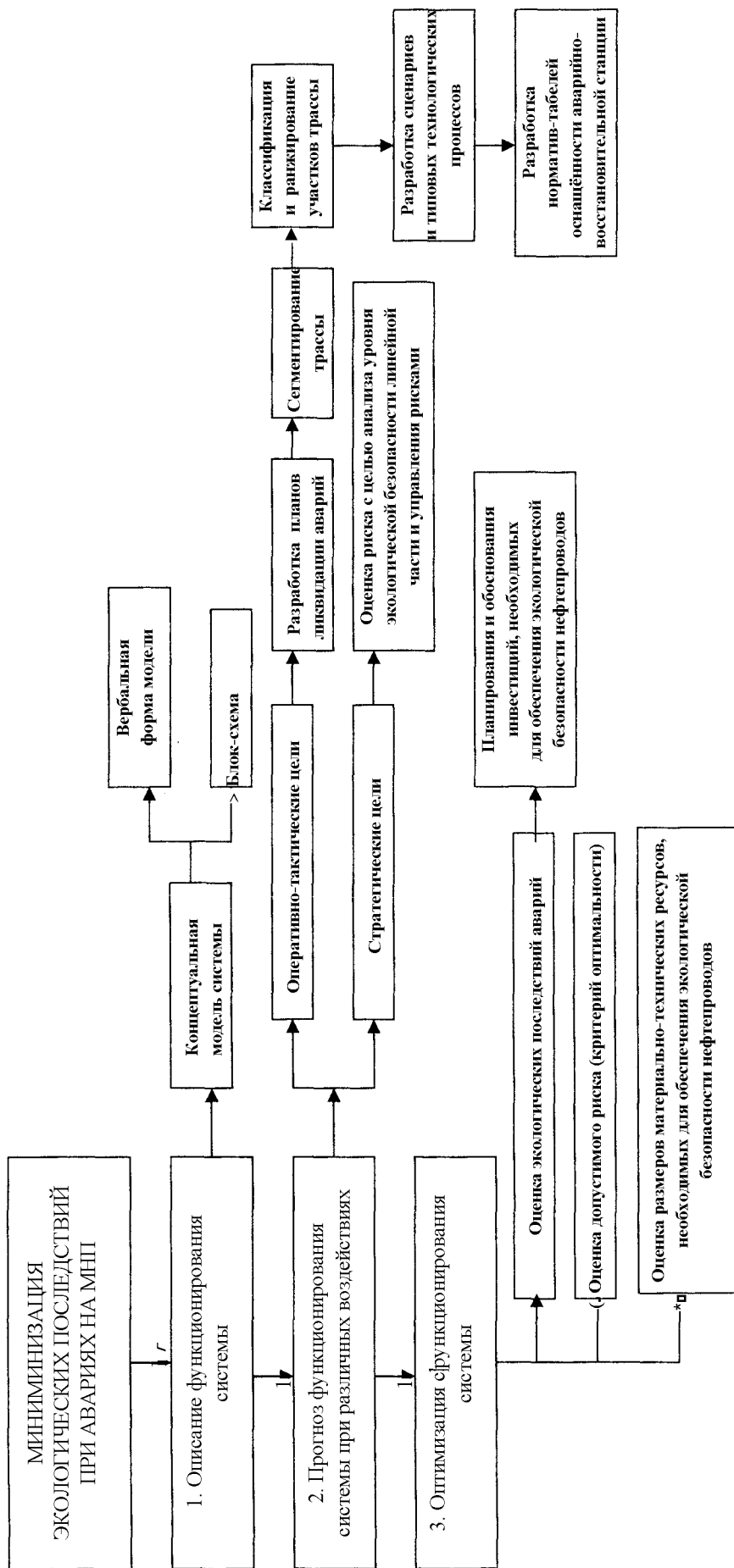


Рис. 2. Дерево целей и задач для разработки моделей аварий

В рамках решаемой проблемы в качестве опосредованной оценки экологических последствий наиболее рациональным является использование величины экономического ущерба от загрязнения окружающей среды. Оценка экологических последствий в форме экономического ущерба имеет ряд достоинств, отмеченных в [6]. В частности, это позволяет интегрально оценивать экологические последствия уже в том виде, как его воспринимает общество (через нормативные методики оценки ущерба) [15-17].

Правомерность использования нормативных методик в качестве прагматических моделей обоснована в [4].

Использование экономического показателя в качестве меры экологических последствий облегчает введение экономических механизмов управления экологическим обеспечением производства и даёт возможность приводить к одной размерности оценку основной деятельности предприятия и экологическую оценку последствий этой деятельности.

Конечно, полнота и эффективность этого подхода определяется качеством методик экономической оценки экологического ущерба. Нормативные методики дают довольно грубую, осреднённую оценку экологических последствий с точки зрения учёта всех показателей экологического состояния природного объекта, поэтому их необходимо совершенствовать, повышая их точность за счёт полноты учёта показателей экологического состояния природного объекта.

Расчёты экологических последствий, выраженных в форме экономического ущерба, можно проводить как для случаев реальных аварий, так и для оценки ожидаемых последствий возможных аварий.

Примером использования такой модели, которая описывает взаимодействие нефтепровода с водными объектами при авариях [6], может явиться рассмотрение в качестве модели Методики подсчёта убытков, причинённых государству нарушением водного законодательства [15].

В этой методике техногенез определяется объёмом разлившейся нефти, экологическим состоянием природного ландшафта - категорией водного объекта, эффективностью защитных мероприятий - объёмом собранной нефти и временем сбора, экологическими последствиями - размерами ущерба.

Несмотря на свою структурную простоту, эта модель обладает целым рядом достоинств, которые позволяют использовать её для определения направлений обеспечения защиты водных объектов (поскольку в этой модели все элементы представлены в самом обобщённом виде, то она может использоваться для выявления стратегических направлений обеспечения защиты). В частности, эта модель указывает, в каких направлениях нужно осуществлять повышение эффективности системы защиты водных объектов: уменьшение количества нефти, поступившей в водный объект при аварии; увеличение количества собранной нефти; сокращение времени сбора.

Недостаток модели, представленной в такой форме, состоит в том, что в ней не учитывается влияние характеристик и состояния промышленного объекта и компонентов геоландшафта на величину воздействия на водный объект. Поэтому такая модель не даёт оснований для выработки алгоритма, описывающего влияние этих характеристик на размеры последствий.

В частности, не учитываются условия протекания аварии, т.е. связь между объёмом эмиссии и объёмом нефти, попавшей в водный объект. Отсутствие учёта этих условий не даёт основания для разработки профилактических и оперативных процедур, направленных на предотвращение или минимизацию загрязнения водного объекта разлившейся нефтью.

Оценка состояния геосферы через учёт вида водных объектов (в обсуждаемой методике учитываются только два вида водных объектов [6]) - очень грубая и недостаточная, она не раскрывает всех свойств рассматриваемого компонента геосферы и поэтому не позволяет в полной мере учесть сущность экологических последствий. Оценка экологических последствий в виде ущерба даёт только опосредованную и не очень точную оценку экологических последствий.

В то же время научно-методологическое значение такой модели состоит в том, что она содержит и учитывает все элементы геосистемы *нефтепровод - окружающая среда (водные объекты)*, а несовершенства этой модели указывают, в каком направлении необходимо вести дальнейшую разработку. Эти направления следующие:

- необходимо существенно расширить качественное и количественное описание состояния геоландшафта. Это необходимо сделать по двум причинам: 1) для оценки экологических последствий нужно более полно учитывать характер загрязняемого компонента природной среды; 2) необходимо знать геоландшафтные характеристики территории с тем, чтобы учитывать механизм развития аварии, и на этом основании разрабатывать мероприятия по прогнозированию, предотвращению или минимизации загрязнения;

- необходимо усовершенствовать показатель экологических последствий с тем, чтобы его можно было использовать при прогнозировании, а также с тем, чтобы этот показатель в более полной мере отражал весь реальный спектр экологических потерь.

Проведение усовершенствования модели (точнее, разработку новых) необходимо проводить с учётом тех особенностей, которые присущи рассматриваемой ситуации, т.е. загрязнению водного объекта при авариях на МНП. Эти особенности проявляются в следующем:

- на величину последствий оказывают влияние геоландшафтные характеристики местности;
- магистральные нефтепроводы - протяжённые объекты, вдоль трассы которых существуют различные геоландшафтные условия.

Если обобщить все особенности рассматриваемой ситуации, то они состоят в следующем:

- воздействие на водные объекты происходит во время аварий, время и место возникновения которых подчиняются стохастическим зависимостям;
- объём разлившейся нефти зависит как от детерминированных, так и от недетерминированных величин;
- доля нефти, попавшей в водный объект, зависит от геоландшафтной характеристики местности, в которой произошла авария; эти характеристики не подлежат аналитическому представлению и могут быть выражены в виде признаков, присущих данной территории;
- в каждой точке трассы МНП существует своя геоландшафтная ситуация, кроме того, во время аварии действуют метеорологические факторы, которые имеют вероятностный характер.

Создание моделей, в которых бы учитывались сформулированные выше требования, может основываться на применении *качественного описания признаков (параметров) и их последующей квантификации*. Обладая, по сравнению с аналитическими методами, определенными недостатками, этот метод позволяет преодолеть трудности, связанные с использованием аналитической модели, и обеспечивает практически неограниченные возможности учёта всех факторов, которые оказывают влияние на поведение системы.

Если вернуться к модели, предназначенной для оценки экологических последствий реальных аварий, то использование нормативных методик оценки ущербов от загрязнения компонентов окружающей среды [15 - 17] в качестве прагматических моделей аварий нефтепроводов в рамках построения системы защиты окружающей среды безусловно соответствует практическим потребностям. Такие модели могут успешно использоваться и для оценки ожидаемых ущербов при возможных авариях. В этом случае расчёты необходимо будет проводить на базе моделей, созданных для прогнозирования развития аварии. В основе создания таких моделей лежит разработка сценариев развития аварий.

Прогнозирование развития аварии. Модель аварии, предназначенная для прогнозирования её развития, - *модель развития аварии* (подсистема развития аварии в структурной схеме, см. рис. 1) должна использоваться для достижения оперативно-тактических и стратегических целей.

Оперативно-тактическая цель состоит в обеспечении подготовки и проведении практической деятельности по минимизации экологических последствий аварий путём планирования и проведения послеаварийных мероприятий. Эта цель достигается путём решения задачи по разработке планов ликвидации аварий, включающих ранжирование участков трассы, разработку типовых технологических процессов и обоснование нормативов технической оснащённости аварийно-восстановительных подразделений, а также определение ожидаемого ущерба от возможной аварии.

Для достижения *стратегической цели* необходимы общая оценка уровня экологической безопасности нефтепровода в целом, выявление его наиболее опасных элементов и ранжирование их по степени опасности с целью целенаправленного комплексного воздействия на множество факторов, обеспечивающих состояние каждого элемента. Стратегическая цель состоит в достижении возможности управления уровнем экологической безопасности, что достигается путём общей оценки уровня экологической безопасности нефтепровода в целом, выявлении его наиболее опасных элементов и ранжировании их по степени опасности и в целенаправленном комплексном воздействии на множество факторов, обеспечивающих состояние каждого элемента.

На подсистему развития аварии оказывают воздействие сигналы, идущие из подсистем окружающей среды, подготовки к проведению аварийных работ, предотвращения и ликвидации загрязнения, нормативно-методической поддержки и правового и экономического регулирования.

Непосредственно для формализации описания процесса развития аварии может быть использован метод, который известен как *метод деревьев событий* [18]. В нашем случае этот метод можно применить для рассмотрения всех вариантов развития аварии, т.е. перемещения разлившейся нефти по территории, примыкающей к месту разгерметизации трубопровода. При этом в качестве исходного события должна приниматься разгерметизация нефтепровода, а дальнейшее перемещение разлившейся нефти рассматриваться как развитие аварии. В этом случае развитие аварии будет происходить под воздействием факторов различной природы (технологических, геоландшафтных и метеорологических) [3]. Дерево событий представляет собой графическое отображение пакета предполагаемых сценариев, которые могут быть реализованы при возможной аварии (рис. 3).

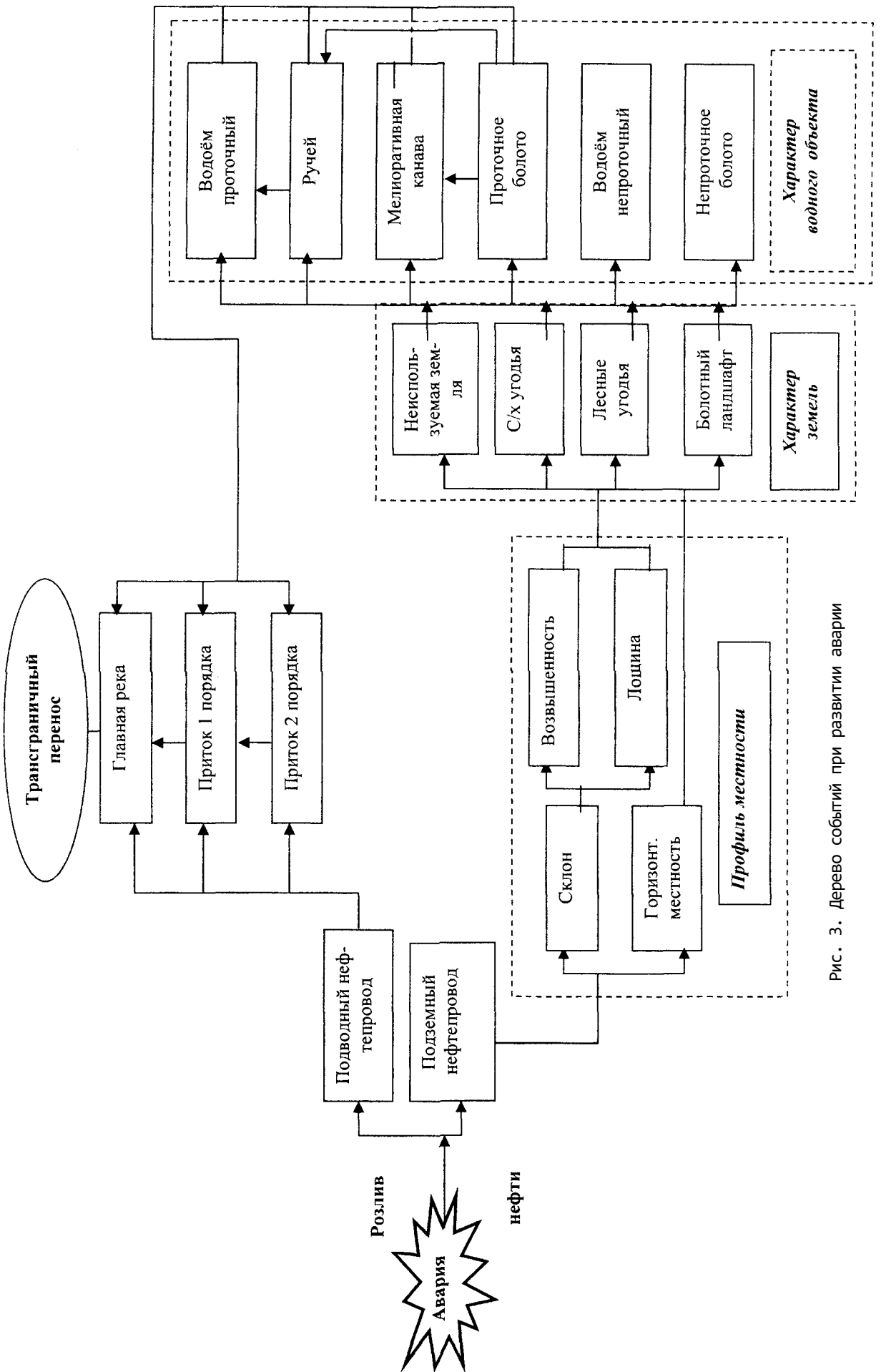


Рис. 3. Дерево событий при развитии аварии

Использование метода деревьев событий для создания модели аварии, предназначенной для её прогнозирования, предоставляет возможность в вербальной форме представлять последовательность событий и определять взаимосвязи между факторами влияния и характером загрязнения объектов окружающей среды. Применение метода обеспечивает полноту выявления всех возможных сценариев развития аварии.

Многообразие сочетания геоландшафтных и метеорологических факторов, под воздействием которых будет развиваться возможная авария, связанное с большой протяжённостью нефтепроводов, вызывает необходимость вести разработку и анализ чрезвычайно большого количества предполагаемых сценариев. В связи с этим возникла необходимость провести определённую типизацию и систематизацию геоландшафтных ситуаций.

С этой целью предложено сегментировать трассу нефтепровода, представив её как последовательную совокупность автономных участков, границами которых являются точки пересечения трассы с водораздельными линиями водосборных бассейнов, по которым проходит нефтепровод [6]. Каждый автономный участок является локальным природно-техническим комплексом с присущими ему характерными признаками геоландшафта. На основе анализа этих признаков определен ряд типов ландшафтных ситуаций [19], отличающихся сочетанием геоландшафтных признаков на автономных участках трассы нефтепровода. Для каждого типа геоландшафтной ситуации разработаны типовые технологические процессы проведения послеварийных работ, направленных на предотвращение и ликвидацию экологических последствий аварийного разлива нефти. Таким образом, абстрактная модель аварии, представленная в форме дерева событий, позволяет рассмотреть варианты сценариев развития возможной аварии на каждом участке трассы нефтепровода и по этим сценариям на основе типовых технологических процессов осуществлять разработку планов ликвидации аварий.

Оценки риска. Для общей оценки уровня экологической безопасности нефтепровода в целом, выявления его наиболее опасных элементов и ранжирования их по степени опасности необходимо формализовать описание элементов модели (подсистем модели) и взаимодействие между этими элементами (подсистемами). Для каждой подсистемы (элемента) этой модели нужно указать характеризующую её функцию и зависимости, которые описывают взаимодействие этих элементов.

В связи с тем, что воздействие возникает в результате аварии и проявляется в виде определённого объёма разлившейся нефти, необходимо иметь модель магистрального нефтепровода, которая бы описывала рассматриваемый нами случай - загрязнение водных объектов при аварии.

Модель трубопровода (в модели структуры это подсистема транспортирования нефти, см. рис. 1) в данном случае должна отображать возможность возникновения аварии на нефтепроводе и оценивать воздействия, которые при этом оказываются на окружающую среду. Для построения модели можно использовать такое представление: в каждой точке трубопровода существует вероятность разгерметизации. Функция, характеризующая вероятность разгерметизации, будет представлять собой модель трубопровода, характеризующую способность трубопровода создавать аварии. Масштаб воздействия определяется размером аварийного отверстия и количеством разлившейся нефти. В [6] представлен функционал, который является моделью трубопровода, в которой в обобщённом виде учтены действия всех факторов.

Наступление стохастического события разгерметизации трубопровода вызывает разлив нефти, однако количественные параметры этого разлива (V - общий объём разлившейся нефти) зависят от ряда параметров [11,20] и в общем виде могут быть представлены в виде функционала:

$$V = \begin{cases} \text{Ив} \left[R_{om} = \lambda_n \gamma_m^L \right] \\ \text{Тех} \left[V_{m_i} = f(p_k) \right] \\ \text{Гео} \left[V_{z_i} = \phi(z_i), V_{l_i} = \psi(l_i) \right] \\ \text{Обн} \left[k_r = g(r_i) \right] \end{cases}, \quad (2)$$

где Om [...] - функции, определяющие риск R_{om} разгерметизации с появлением дефектного отверстия с характерным размером; γ'_m - весовой коэффициент дефектного отверстия с характерным размером L ;

Tex [...] - функции, определяющие зависимость объёма разлившейся нефти от технологического режима перекачки в момент аварии; p_k - функции, характеризующие значения давления в трубопроводе; Geo [...] - функции, определяющие влияние профиля трассы (геодезических характеристик z_i) и расположения задвижек l_i на объём разлившейся нефти; $Обн$ [...] - функции, определяющие влияние эффективности системы обнаружения утечек и быстрого действия механизмов закрытия задвижек r_i на объём разлившейся нефти.

Таким образом, параметры выхода подсистемы транспортирования нефти (модели трубопровода) могут квантифицироваться значениями *технологического риска* [8, 21], который может иметь «размер-

ность» вероятности разлива определённого количества нефти, как произведение вероятности разгерметизации трубы в данной точке трассы на вероятность разлива в этой точке определённого количества нефти. Известна методика [8, 22], которая позволяет определить вероятность разгерметизации нефтепровода с образованием отверстия определённого размера. Эта методика построена на использовании балльной оценки условий, влияющих на разгерметизацию нефтепровода. В ней введены 58 факторов влияния, которые объединены в восемь групп.

На значения этих факторов оказывают влияние подсистема обеспечения безаварийной работы и подсистема предотвращения и ликвидации загрязнения водного объекта [3].

Откликом на воздействие первой из этих двух подсистем является изменение динамики (частоты аварий, т.е. вероятности разгерметизации) и мощности (воздействия в виде объёма разлившейся нефти) «сигнала» выхода из подсистемы транспортирования. Откликом на дискретное воздействие подсистемы обнаружение утечек (подсистема второго уровня) является генерирование в подсистеме транспортирования «сигнала» выхода о переходе всей системы на аварийный режим работы. Понятие «вероятность разгерметизации» в данном случае выступает в качестве величины, характеризующей надёжность трубопровода, или является итоговым выражением деятельности по обеспечению надёжности. Значение вероятности квантифицирует уровень надёжности. А понятие «мощность» характеризуется объёмом разлившейся нефти и является мерой воздействия на объекты природы.

Модель развития аварии (подсистема развития аварии, см. рис. 1) отражает комбинацию физических процессов взаимодействия разлившейся нефти с элементами окружающей среды, связанных сложным взаимодействием разнообразных параметров, значения которых и закономерности их взаимного влияния описываются сложными детерминированными и стохастическими зависимостями.

На подсистему развития аварии оказывают воздействие сигналы, идущие из подсистем окружающей среды, подготовки к проведению аварийных работ, предотвращения и ликвидации загрязнения и нормативно-методической поддержки и правового и экономического регулирования.

На характер развития аварии, наряду с технологическими факторами (объём разлившейся нефти, её свойства) значительное, а чаще всего *определяющее влияние оказывают голандшафтные факторы* - состав компонентов ландшафта и их взаимное расположение (характер земель, водных объектов, растительности, профиль местности и т.п.). Заметное влияние на развитие аварии могут оказывать метеорологические факторы: температура воздуха и воды, наличие снега, льда. Следует подчеркнуть, что сигналы выхода подсистемы окружающей среды носят стохастический и неуправляемый характер. Подсистема окружающей среды может быть формализована в виде *модели территории*, в которой признаки, присущие компонентам окружающей среды, используются как факторы влияния.

Подсистема развития аварии, более подробная структурная схема которой приведена в [3], в результате сложного взаимодействия входящих в неё элементов, а также под воздействием сигналов других подсистем, входящих в модель структурной схемы проблемы загрязнения водных объектов (см. рис. 1), на «выходе» вырабатывает «сигнал», который является входом в подсистему последствий.

Если говорить об экологических последствиях (подсистема последствий, см. рис. 1), то для их оценки могут применяться как натуральные, так обобщённые показатели. Формы проявления экологических последствий очень многообразны, трудно поддаются изучению и ещё более трудно описываются количественно в обобщённом виде.

Большая часть «сигналов», которые «вырабатываются» элементами подсистемы развития аварии и другими подсистемами, оказывающими воздействие на эту подсистему, не могут быть описаны аналитическими зависимостями. В этом случае наиболее полное описание модели может быть обеспечено путём использования факторов влияния, значения которых квантифицируются путём присвоения весовых коэффициентов или баллов [21]. Такой подход находит применение [7, 18, 21 - 24, 27], при этом значения весовых коэффициентов (баллов) назначаются на основании статистических данных или экспертным методом [8]. Пример использования такого подхода при оценке экологических последствий при авариях на нефтепроводах рассмотрен в [25]. Значения рисков, подсчитанных на основании балльных оценок факторов влияния, с одной стороны, получаются на основании сколь угодно полного учёта всех факторов влияния («сигналов», вырабатываемых всеми элементами системы), с другой стороны, квантификация этих факторов связана с определёнными сложностями и в ряде случаев осуществляется без достаточных оснований.

Квантификация факторов влияния. Для определения значений баллов, присваиваемых отдельным признакам, характеризующим факторы влияния, предлагается ввести понятие *схематизированной модели возможной аварии* (СМВА).

Цель построения и использования СМВА - обоснование значений баллов, присвоенных факторам, влияющим на величину экологических последствий аварий.

За основу СМВА берётся прагматическая модель, построенная на базе нормативной методики определения ущерба при загрязнении компонентов окружающей среды. В этом случае модель будет иметь наи-

более простой состав. Она будет представлять собой алгоритм вычисления ущерба, основанный на нормативной методике. Этот алгоритм включает в себя *основные параметры*, которые оказывают основополагающее влияние на формирование ущерба, или, косвенным образом, экологических последствий аварии.

$$y=f(P, I), \quad (13)$$

где $У$ - величина ущерба; P - значения основных параметров; I - порядковый номер основного параметра в диапазоне 1-я.

При использовании СМВА в таком виде реальная авария обезличивается, а вместо неё рассматривается схема (модель) аварии, характеризуемая рядом основных параметров. Например, для случая загрязнения водных объектов два основных параметра, в обобщенном виде, характеризуют элементы ПТК: категория водного объекта (J), которая в данном случае выражает свойство гидросферы и количество разлившейся нефти (P_2), характеризующее техногенное воздействие. Два других основных параметра, также в обобщенном виде, характеризуют эффективность проведения мероприятий по ликвидации последствий: количество нефти, извлечённой из водного объекта (P^n) при проведении мероприятий по ликвидации аварии, и время, в течение которого была извлечена нефть (PJ) из водного объекта.

Как уже указывалось, этой модели присущи ряд достоинств и недостатков. Основные недостатки состоят в неполноте учёта всего спектра экологических последствий, сопровождающих загрязнение компонентов геосферы, а также в том, что модель «не чувствует» действие факторов, влияющих на развитие и последствия аварии, что не даёт возможности использовать её для разработки планов ликвидации аварий.

Такая модель (3) представляет собой *идеальную схематизированную модель возможной аварии*. Если по этой модели провести расчёты для диапазонов значений *факторов*, влияющих на основные параметры, то можно оценивать влияние каждого фактора на величину ущерба.

Поэтому идеальная СМВА может быть положена в основу более развитой и усовершенствованной модели. Её усовершенствование может осуществляться путём введения в модель учёта факторов, оказывающих влияние на формирование значений каждого из используемых основных параметров. Введение в рассмотрение этих факторов даёт возможность учитывать влияние характеристик и состояния промышленного объекта и компонентов геоландшафта на величину экологических последствий. Количественная оценка меры влияния каждого фактора является сложной задачей.

Существует достаточно веские обоснования того, чтобы эту оценку осуществлять с помощью балльной системы оценок. Это утверждение может быть проиллюстрировано таким примером. Рассмотрим, каково влияние расстояния от места аварии до водного объекта? Чем больше расстояние, тем меньший объём нефти попадает в водные объекты (зависит от рельефа местности, типа почвы) и меньше времени нефть будет находиться в водном объекте. Чтобы установить влияние расстояния на количество нефти, попавшей в водные объекты, нужно знать физический процесс перемещения нефти по поверхности (нефтеёмкость грунта, адгезионную способность растительности, неровности микрорельефа). Другими словами, нужно оценить, какое количество нефти остаётся на каждом метре расстояния от места аварии до водного объекта. В этом примере зависимость выглядит следующим образом:

$$U_{\text{клет}} \sim V_{\text{земли}}$$

где $U_{\text{клет}} = /(\text{расстояние, рельеф, тип грунта, растительность, испарение})$.

Под действием каждого из этих аргументов нефть остаётся на поверхности земли или уходит в атмосферу (происходит перераспределение нефти между сферами). Влияние каждого из этих аргументов на количество нефти, оставшееся на земле или испарившееся в атмосферу, проявляется в ходе соответствующего физического процесса. Детерминированные аналитические зависимости, описывающие эти процессы в принципе, уже существуют. Однако их практическое использование не всегда сможет быть эффективным из-за большого разнообразия, а главное - неопределённости условий, которые существуют на местности (например, рельеф и растительность). Кроме того, непосредственный расчёт для этих зависимостей потребует очень большого вычислительного ресурса. Результаты, полученные ценой большого объёма вычислительной работы с заведомо невысокой точностью, будут использованы для оценки влияния признаков, которые могут оказывать небольшое влияние на количество нефти, остающееся на земле. Поэтому в настоящее время осуществлять оценку влияния признаков путём расчётов по детерминированным аналитическим зависимостям нецелесообразно, а в ряде случаев невозможно. В дальнейшем, по мере накопления аналитических или экспериментальных результатов исследований по влиянию признаков местности на поведение нефти, проведение таких расчётов может стать оправданным.

Присвоение факторам балльной оценки осуществляется или путём анализа статистических данных, или экспертным путём. Оба эти метода имеют свои ограничения, связанные как с недостаточностью статистических данных (реальные аварии происходят достаточно редко), так и с определённой субъективностью, присущей экспертному методу.

Суть предлагаемого метода назначения баллов состоит в том, что выявляются факторы, оказывающие влияние на формирование основных параметров F_j . Значения этих факторов задаются в определённом диапазоне (шкалируются), в котором могут изменяться *признаки*, характеризующие рассматриваемый фактор, и одним из доступных способов определяется влияние этого фактора на значение основного параметра F_j : $j = \langle p \rangle$ (s_j). Для каждого из новых значений основного параметра по алгоритму идеальной СМВА вычисляется значение ущерба:

$$Y = f\{P_i, [F_j/s_j]\}, \quad (4)$$

где F_j - фактор влияния; y - порядковый номер фактора влияния в диапазоне 1 ... 7; 5 - значение фактора влияния; κ - порядковый номер значения признаков в диапазоне 1 ... q .

Схематизированная модель возможной аварии, предназначенная для учёта влияния факторов на величину параметров (4), можно рассматривать как *виртуальную схематизированную модель возможной аварии*.

Выбор факторов влияния, относящихся к параметру P_i , должен быть направлен на обеспечение более полного учёта всего спектра экологических последствий, сопровождающих загрязнение компонентов геосферы.

Выбор факторов влияния, относящихся к параметру P_2 , должен базироваться на анализе физических процессов, происходящих при взаимодействии разлившейся нефти с элементами геоландшафта.

Факторы влияния, относящиеся к параметрам P_3 и P_4 , должны учитывать геоландшафтные условия, в которых будут проводиться работы по ликвидации аварии, наличие планов ликвидации аварий, наличие стационарных защитных сооружений и степень совершенства технологических процессов и специального оборудования для локализации и сбора нефти.

Диапазон значений ущербов, соответствующий рассмотренной шкале значений фактора влияния, будет соответствовать диапазону баллов, которые должны присваиваться данному фактору влияния. Набор признаков, которые характеризуют каждый из выявленных факторов влияния, в одних случаях может быть представлен в виде шкалы значений, представляющих собой числа. Например, количество нефти, которое попадает в водный объект (параметр P_2), зависит от расстояния между точкой разгерметизации и водным объектом, которое в виртуальной СМВА может быть представлена в виде диапазона (шкалы) значений расстояний 1 ... q_u , а параметр P_r (количество нефти, извлечённой из водного объекта) - от скорости течения реки, которая также может быть представлена в виде диапазона (шкалы) значений скоростей потока 1 ... q_2 .

В ряде случаев факторы не могут быть охарактеризованы признаками, задаваемым числом. По своему характеру они могут быть представлены только качественной характеристикой (т.е. вербально), но этот качественный признак может оказывать существенное влияние на величину ожидаемого ущерба. Например, параметр P_3 в большой степени зависит от того, является водный объект водоёмом или водотоком, а параметр P_2 - от наличия на местности между точкой разгерметизации и водным объектом оврагов, лощин, канав, пересыхающих русел. Эти признаки не могут быть охарактеризованы числом, а их влияние не может быть охарактеризовано детерминированной аналитической зависимостью.

Но и в тех случаях, когда получение аналитических зависимостей возможно (например, движение слоя нефти по склону местности на базе известных моделей Нуссельта, а также П.Л. Капицы и С.П. Капицы [26]), область использования результатов такого решения может быть ограничена. В рассматриваемом примере это объясняется, по крайней мере, тремя причинами. Во-первых, параметры струи нефти, выходящей из трубопровода под большим давлением, зависят от координат аварийного отверстия по окружности трубы и размеров отверстия, которые являются величинами, имеющими стохастическую природу. А параметры струи, в свою очередь, определяют форму, размеры (толщина и площадь) и местоположение пятна нефти, которое формируется в месте разгерметизации и которое стекает по склону. Во-вторых, необходимо поддерживать очень ёмкую базу данных по геоландшафтной ситуации в каждой точке трассы, что само по себе является сложной и дорогостоящей задачей. В-третьих, особенности микрорельефа местности и состояние растительности, которые будут оказывать заметное влияние на характер отекания "нефти по наклонной поверхности земли, нестабильны и трудно поддаются количественной оценке. Поэтому применение известного решения о движении слоя нефти по наклонной поверхности в данном случае может дать результаты, сильно отличающихся от реальных, так как в реальных условиях этот процесс подвержен воздействию очень большого количества факторов, которые не могут быть учтены в аналитической зависимости. К этому следует добавить, что нефть по склону может стекать не только в виде плёнки, а и виде открытого потока, сформировавшегося в русле локального протяжённого углубления ландшафта.

Проведенный анализ рассмотренного примера проиллюстрировал, в каких сложных условиях протекают физические процессы взаимодействия разлившейся нефти с компонентами геосферы. Аналогии-

ное положение складывается и с расчётами влияния на основные параметры других факторов, общее количество которых в виртуальных СМВА может быть достаточно большим. При таких условиях использование аналитических зависимостей целесообразно для оценки порядка величин, характеризующих степень влияние рассматриваемого параметра.

В таблице приводятся примеры некоторых факторов влияния, относящиеся к различным основным параметрам СМВА.

Наименование параметра P_i	Факторы h	Диапазон значений признаков факторов $s_{ij} (1 \dots q)$	Характер зависимости фактора F_i от параметра s_{ij}
P_1 - категория водного объекта	Специально охраняемые водные объекты (заповедники)	-	Качественный
	Водные объекты в зонах отдыха	-	Качественный
	Водотоки (реки главные)	-	Качественный
	Водотоки (притоки 1 рода)	-	Качественный
	Водотоки (притоки 2 рода)	-	Качественный
P_2 - количество нефти, попавшей в водный объект	Подводный переход	-	Качественный
	Расстояние от места аварии до водного объекта, км	(...)	Детерминированный
	Горизонтальный рельеф	-	Детерминированный
	Наклонный рельеф, град	(...)	Детерминированный
	Наличие оврагов, ложины, канав, пересыхающих русел	-	Качественный
	Нефтеёмкость грунта	(...)	Детерминированный
	Характер растительности	-	Качественный
	Расстояние от базы аварийно-восстановительной станции до места аварии, км	(...)	Детерминированный
P_3 - количество нефти, извлечённой из водного объекта	Скорость потока в реке	(...)	Детерминированный
	Суммарная производительность нефтесборных устройств	-	Детерминированный
	Характеристика удерживающей способности бонового ограждения	~	Детерминированный
	Наличие стационарных пунктов удержания нефти	-	Качественный
/ $\%$ - время, в течение которого была извлечена нефть	Суммарная производительность нефтесборных устройств	(...)	Детерминированный
	Расстояние от базы аварийно-восстановительной станции до места сбора нефти, км	(..)	Детерминированный

Предложенный подход позволяет с системных позиций вводить в рассмотрение практически все факторы, влияющие на развитие и последствие аварии и количественно учитывать степень их влияния.

Выводы

Обоснованно, что в силу сложности и многофакторности процессов, сопровождающих явление аварии на нефтепроводах, для его изучения и управления им необходимо создать её модель с позиций системно-целевого подхода.

Указаны основные цели, для достижения которых будут использованы создаваемые модели: описание функционирования системы; прогноз функционирования системы при различных воздействиях; оптимизация функционирования системы.

Показано, что при разработке разных моделей аварий возникает необходимость в использовании широкого спектра методов квантификации факторов, влияющих на развитие и последствия аварий и разных видов зависимостей, характеризующих их взаимодействие.

Обоснованно использование нормативных методик в качестве прагматических моделей для оценки ущербов реальных и возможных аварий и в качестве схематизированных моделей для присвоения балльных оценок факторам влияния.

Показано, что в качестве основного метода построения модели аварии нефтепровода должен быть использован риск-анализ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. - 6-е изд. - М.: Наука, 1967. - 428 с.
2. Эпштейн Л.А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов. - Л.: Судостроение, 1970. - 208 с.
3. Липский В.К. Система защиты водных объектов от загрязнения при авариях на магистральных нефтепроводах Беларуси // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. - 2002. - Т. 1, №2. - С. 3-16.
4. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. - М.: Высшая школа, 1989. - 367 с.
5. Мазур И.И., Молдаванов О.И. Введение в инженерную экологию. - М.: Наука, 1989. - 375 с.
6. Липский В.К. Методы оценки параметров системы защиты водных объектов при авариях на нефтепроводах // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. - 2004. - №1. - С. 16-24.
7. Угольницкий Г.А. Управление эколого-экономическими системами. - М.: Вузовская книга, 1999. - 132 с.
8. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах: Сер. 27. Вып. 1. - М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. - 96 с.
9. Власак П., Липский В.К. Экологические аспекты трубопроводного транспорта // Охрана окружающей среды. - 1982. - Вып. 1. - С. 59 - 62.
10. Мазур И.И., Иванцов О.М., Молдованов О.И. Конструктивная надёжность и экологическая безопасность трубопроводов. - М.: Недра, 1990. - 264 с.
11. Лис Л.С. Оценка экологического состояния природно-территориальных комплексов. - Мн.: Принт групп, 2004. - 109 с.
12. Лис Л.С. Методические рекомендации по количественной оценке экологического состояния природно-территориальных комплексов. - Мн.: Принт групп, 2004. - 109 с.
13. Хоружая Т.А. Методы оценки экологической опасности - М.: Экспертное бюро-М, 1998. - 224 с.
14. Измалков В.И., Измалков А.В. Техногенная и экологическая безопасность и управление риском. - СПб.: НИЦЭБ РАН, 1998.-482 с.
15. Методика подсчёта убытков, причинённых государству нарушением водного законодательства: Утв. М-вом природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 6 января 1995 г.
16. Временная методика определения размера экономического ущерба, причинённого загрязнением, деградацией и нарушением земель: Утв. М-вом природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 20 мая 1997 г.
17. Инструкция по расчету размера возмещения вреда, причиненного окружающей среде сверхнормативными выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух: Утв. М-вом природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 31.12.2004 г. № 50.
18. Елохин А.Н. Декларирование безопасности промышленной деятельности: методы и практические рекомендации. - М., 1999. - 114 с.
19. Инструкция по защите окружающей среды при авариях на нефтепроводах: Утв. Концерном «Белнефтехим» 3.10.02, №480.
20. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность трубопроводного транспорта. - М.: МГФ «Знание», 2002. - 752 с.
21. Балльная оценка возможных последствий аварий на нефтепроводах / В.К. Липский, А.И. Вегера, А.Г. Кульбей, А.В. Криволапов: В сб. науч. тр. Вып. 3. - Новополоцк: ПГУ, 2003. - С. 148 - 160.
22. Концепция методического руководства по оценке степени риска магистральных трубопроводов ЛО.В. Лисин, А.Ю. Верушин, М.В. Лисанов и др. //Трубопроводный транспорт нефти. - 1997. - № 12.
23. Нормы периодичности обследования магистральных трубопроводов внутритрубами инспекционными приборами: Методическое руководство РД 153-39-029-98: Утв. Госгортехнадзором России 23.03.98 г. и Минтопэнерго России 22.07.98 г.
24. Перспективы нормативного обеспечения анализа риска магистральных нефтепроводов / М.В. Лисанов, В.Ф. Мартынюк, А.С. Печёркин и др. //Трубопроводный транспорт нефти. - 1996. - № 8.
25. Липский В.К., Вегера А.И., Криволапов А. В. Оценка последствий возможных аварий на нефтепроводах // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. - 2004. - № 12. - С. 96 - 107.
26. Ромашов П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. - 3-е изд., перераб. - Л.: Химия, 1982 -.288 с.
27. Козлитин А.М., Попов А.И. Методы технико-экономической оценки промышленной и экологической безопасности высокорисковых объектов техносферы. - Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. - 216 с.