

УДК 629.11.011.38

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ АВАРИЯХ НА НЕФТЕПРОВОДАХ

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

Рассмотрены общие подходы к исследованию взаимодействия элементов промышленных экосистем и показаны основные соотношения, связывающие эти элементы. Предложен метод исследования количественных зависимостей влияния техногенеза на изменение экологических характеристик геоландшафта, основанный на использовании оценки ущерба, как интегрального показателя экологических последствий. Рекомендовано использование риск-анализа в качестве эффективного метода построения количественных зависимостей, характеризующих промышленные экосистемы.

Введение

Тревожной особенностью современного этапа развития человеческой цивилизации является появление признаков глобального экологического кризиса, который проявляется как неразрешимое на сегодня противоречие между стремлением к неконтролируемому расширению материального производства, основанному на потреблении природных ресурсов и загрязнении окружающей среды, и способностью биосферы поддерживать систему естественных биохимических циклов самовосстановления.

Развитие глобального экологического кризиса, прежде всего, связано с техногенными процессами, с увеличением объема и темпов хозяйственной деятельности. В XX веке человечество произвело продукции больше, чем за всю предшествующую историю цивилизации, например, в 1990 г выпуск продукции превысил аналогичный показатель 1950 г в 5 раз [1, 2].

Особенно тяжелые экологические последствия, требующие принятия долгосрочных природоохранных мер, создают техногенные процессы аварийного характера, которые часто связаны с крупномасштабными залповыми эмиссиями опасных веществ или излучениями. Последние десятилетия ознаменовались значительным ростом количества аварий и катастроф на промышленных объектах. На два последних десятилетия приходится 50 % крупнейших промышленных аварий и катастроф, произошедших в XX в [3]. Связь между техногенными процессами, авариями, катастрофами и кризисной экологической ситуацией в мире очевидна. К числу наиболее опасных промышленных объектов, аварии на которых могут иметь очень тяжелые экологические последствия, относятся магистральные нефте- и нефтепродуктопроводы (МНП) [4, 5].

К концу двадцатого века проблема экологических последствий воздействия хозяйственной деятельности на природную среду заняла доминирующее положение в обеспечении дальнейшего развития человечества [2, 5]. С одной стороны, хозяйственная деятельность является материальной основой существования современной цивилизации и залогом ее дальнейшего успешного развития, с другой стороны, негативное воздействие производственной деятельности на окружающую природную среду привело к угрозе существованию цивилизации. Создание парадигмы глобальной экологической проблемы может быть достигнуто при условии учета всех ее составляющих и взаимосвязей между ними, что требует выработки адекватных научных подходов.

Для правильного обоснования и выбора методологических принципов исследования глобальной экологической проблемы необходимо определить место этой проблемы в иерархии современных научных знаний [7]. Понятийный аппарат, положенный в основу изучения глобальной экологической проблемы, формируется на стыке многих областей знаний, относящихся к точным и техническим наукам, наукам о природе и смежным наукам. При этом центральным понятием, объединяющим ресурсы всех используемых научных дисциплин, является понятие «*экологическая система*».

Экосистема наделена высокой степенью сложности (невозможность строгого математического описания, многозвенность структурного состава и многосвязность составляющих элементов). Важнейшим свойством экосистемы является *многофакторная корреляция*, которая обуславливает аналитическую предопределенность между необходимостью и случайностью рассматриваемого (прогнозируемого) события. Она обеспечивает мотивацию в выборе математического аппарата исследования (детерминированный, недетерминированный, смешанный). Детерминированный и стохастический подходы взаимовызываются в единой методологической основе, и это предопределяет *комплексный характер* исследований экосистем.

Экосистемам присуща *многосвязность* разнохарактерных формирующих аргументов (физических величин, технических характеристик, факторов техногенного воздействия и антропогенного изменения, методов и принципов исследований, применяемых теорий и т.п.) и *аддитивность*, как способ многопа-

раметрического суммирования локальных экологических эффектов по различным источникам и ареалам распределения факторов промышленного техногенеза.

Обеспечение экологического прогноза предусматривает количественный подход как при оценке качества промышленного техногенеза, так и антропогенного изменения природного ландшафта на основе сбалансированной системы натурных измерений.

В настоящее время наблюдается интенсивный и многоплановый процесс формирования системы знаний, определяющей способы и средства достижения экологически разумного компромисса между человеком и природой, направленного на сохранение природного баланса (гомеостаза) с целью обеспечения устойчивого развития [8].

Закономерности функционирования природно-технических геосистем

Изложим некоторые общие подходы к исследованию взаимодействия элементов экосистемы [7]. Основным элементом окружающей природной среды является ландшафт (геосистема) - территориальное образование, в котором (по В.И. Вернадскому) взаимосвязаны как природные компоненты четырёх геосфер: атмосферы, гидросферы, литосферы и биосферы, так и антропогенно-техногенные элементы.

Будем различать природный (элементарный, естественный) ландшафт, в котором отсутствует влияние антропогенно-техногенных компонентов, и реальный (антропогенный) ландшафт, который формируется под воздействием промышленного техногенеза.

Механизм структурного образования естественного природного ландшафта можно выразить полным дифференциалом функции $e_{ПТГ}(t)$

$$e_{П} = d\varepsilon_{ПТГ}(t) = \frac{\partial \varepsilon_{ПТГ}(t)}{\partial \varepsilon_A} d\varepsilon_A + \frac{\partial \varepsilon_{ПТГ}(t)}{\partial \varepsilon_G} d\varepsilon_G + \frac{\partial \varepsilon_{ПТГ}(t)}{\partial \varepsilon_L} d\varepsilon_L + \frac{\partial \varepsilon_{ПТГ}(t)}{\partial \varepsilon_B} d\varepsilon_B, \quad (1)$$

где $e_{П}$ – интегральная характеристика элементарного природного ландшафта; $\varepsilon_A, \varepsilon_G, \varepsilon_L, \varepsilon_B$ – комплексные характеристики регионального состояния атмосферы, гидросферы, литосферы и биосферы.

Реальный (антропогенный) ландшафт формируется в результате промышленного техногенеза. Уровень негативного техногенного воздействия как характеристика промышленного объекта является показателем его потенциальной экологической опасности. Параметрами техногенного воздействия на

природный ландшафт являются номенклатурный состав техногенных факторов $\sum_{i=1}^n \omega_{m_i}$ и интенсивно-

сти их воздействия, оцениваемые коэффициентами экологической весомости v_{ω_i} . Уровень техногенного воздействия может быть представлен для отдельного вида воздействия объекта (механического, теплового, химического, биологического и т.д.) по единичному показателю уровня $u_i \left(\sum_{i=1}^n \omega_{m_i} \right)$, а для общего воз-

действия объекта – по комплексному показателю $U \left[\sum_{i=1}^N \omega_i (v_{\omega_i}) \right]$. Значения u_i и U определяются из соотношений

$$u = \frac{N[\omega_i(v_{\omega_i})]}{Q}, \quad U = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{Q},$$

где $N(\omega_i)$ – величина ω_i -того показателя конкретного воздействия; Q – величина зоны, подвергаемой техногенному воздействию.

В реальных природно-технических геосистемах формируется техногенный поток Ω разнохарактерных воздействий $\sum_{i=1}^n \omega_i$ на природные объекты (свойства формирующего трудового процесса) – $\Omega \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \right)$.

Результатом техногенного воздействия являются антропогенные изменения природного ландшафта в регионе сооружения или действия промышленного объекта. Показатели антропогенных изменений также могут быть представлены в единичной или комплексной форме. Для заданной номенклатуры таких показателей $\sum_{i=1}^n e_{m_i}$ в качестве обобщенного критерия антропогенного изменения природного ланд-

шафта используются размеры зоны поражения, т. е. $R_s(r_0) = f_0(x, y, z)$. Здесь f_0 – функция экологического воздействия, определяющая реакцию окружающей среды в радиусе R_s .

Взаимодействие промышленных сооружений и природных объектов, расположенных на одной территории, происходит настолько тесно, что для изучения этого взаимодействия весь комплекс природной среды и технических объектов нужно рассматривать как единую систему, которую принято называть *природно-технической геосистемой* (ПТГ) или геотехнической системой.

Интегральная характеристика (экологическая оценка состояния) региональной природно-технической геосистемы выражает совокупные свойства как производные регионального антропогенеза

$$\varepsilon_{ПТГ} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n e_i & \text{– для линейно выраженных функциональных свойств} \\ f(e_1, e_2, \dots, e_n) & \text{– для нелинейно выраженных функциональных свойств,} \end{cases} \quad (2 \text{ а})$$

$$(2 \text{ б})$$

где e_i – i -тое свойство ПТГ из всей n -той совокупности свойств, определяющих её интегральную характеристику.

Выражение (2) для $\varepsilon_{ПТГ}$ представлено в символической форме. Конкретный вид выражения зависит от специфики решаемой задачи. Зависимость (2 а) соответствует аддитивным соотношениям, которые используются при определении комплексных показателей состояния экосистем, а зависимость (2 б) является более общей, так как учитывает физические закономерности формирования экосистем и их функциональные изменения в ходе их развития.

Одна из возможных форм развёрнутого представления интегральной оценки состояния региональной ПТГ в соответствии с (2 а) может быть представлена в виде

$$\varepsilon_{ПТГ} = \left\{ \sum_{i=1}^k e_{A_i}; \sum_{i=1}^l e_{G_i}; \sum_{i=1}^m e_{L_i}; \sum_{i=1}^n e_{F_i}; \sum_{i=1}^r e_{F_n}; \sum_{i=1}^p e_{H_s}; \right\} \quad (3)$$

Входящие в выражения (3) слагаемые определяют интегральную характеристику $\varepsilon_{ПТГ}$, учитывающую $t = k + l + m + n + r + p$ конкретных значений показателей свойств, составляющих интегральную характеристику ПТГ ($i = 1, 2, 3, \dots, t$), сгруппированных по различным признакам, например: группа показателей свойств атмосферы (состояние воздуха) – A ; группа показателей свойств гидросферы (состояние поверхностных и грунтовых вод) – G ; группа показателей свойств литосферы (состояние земной коры, верхней оболочки мантии) – L ; группа показателей свойств флоры (состояние почвенно-растительного слоя, видов растений) – F_l ; группа показателей свойств фауны (состояние видов животных) – F_n ; группа показателей состояния человека – H_s .

В общем случае, соответствующем (2 б), оценка промышленной экосистемы по критериям техногенных $\sum_{i=1}^n \omega_i$ и антропогенных факторов может быть представлена в виде функционала

$$\Phi \begin{cases} Пр \left[\Omega \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \right); \varepsilon_{ПТГ} \left(\sum_{i=1}^n e_i \right); \Lambda(l, s, W) \right], \\ Вр \left[t(\Omega); t(\varepsilon_{ПТГ}) \right] \end{cases} \quad (4)$$

где $Пр [\dots]$, $Вр [\dots]$ – соответственно функции пространственно связанных и временных координат формирующейся экосистемы; $\Lambda(l, s, W)$ – параметр одномерного (l), двухмерного (s) или трёхмерного (W) пространства; $t(\Omega)$, $t(\varepsilon_{ПТГ})$ – соответственно временные координаты развития техногенных воздействий и антропогенных изменений. Функционал является величиной, значение которой определяется заданием составляющих его функций $Пр [\dots]$, $Вр [\dots]$.

Совместное исследование свойств функционала (4) и интегральных критериев техногенного развития производственно-технологических процессов $\Omega \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \right)$ и антропогенного изменения окружающей

природной среды $\varepsilon_{ПТГ} = \sum_{i=1}^k e_{A_i} + \sum_{i=1}^l e_{G_i} + \sum_{i=1}^m e_{L_i} + \sum_{i=1}^n e_{F_i} + \sum_{i=1}^r e_{F_n} + \sum_{i=1}^p e_{H_s}$, представляет теоретическое обоснование научно-методологических основ природоохранной деятельности.

Общая оценка экологической обстановки в природно-технических геосистемах может быть реализована только на основе комплексных исследований прямого и опосредованного воздействия техногенных факторов $\Omega\left(\sum_{i=1}^n \omega_i\right)$ на компоненты природы «A», «G», «L», «Fl», «Fn», «Hs»

Формирование ПТГ обусловлено переходом множества $\{\mathcal{E}_0\}$ в $\{\mathcal{E}_{ПТГ}\}$, то есть

$$\mathcal{E}_0 \left\{ \sum_{i=1}^n e_{A_{\omega_i}}; \sum_{i=1}^n e_{G_{\omega_i}}; \sum_{i=1}^n e_{L_{\omega_i}}; \sum_{i=1}^n e_{Fl_{\omega_i}}; \sum_{i=1}^n e_{Fn_{\omega_i}}; \sum_{i=1}^n e_{Hs_{\omega_i}}; \right\} \rightarrow \quad (5 \text{ а})$$

$$\rightarrow \mathcal{E}_{ПТГ} \left\{ \sum_{i=1}^n e_{A_{\omega_i}}; \sum_{i=1}^n e_{G_{\omega_i}}; \sum_{i=1}^n e_{L_{\omega_i}}; \sum_{i=1}^n e_{Fl_{\omega_i}}; \sum_{i=1}^n e_{Fn_{\omega_i}}; \sum_{i=1}^n e_{Hs_{\omega_i}}; \right\}, \quad (5 \text{ б})$$

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

Объективная оценка экологической ситуации в текущий момент \mathcal{E}_t является комплексной мерой взаимосвязанных свойств формирующего трудового процесса $\Omega\left(\sum_{i=1}^n \omega_i\right)$, образующих множество техногенных факторов и показателей антропогенного изменения природных компонентов

$$\mathcal{E} \left\{ \sum_{i=1}^n e_{A_i}; \sum_{i=1}^n e_{G_i}; \sum_{i=1}^n e_{L_i}; \sum_{i=1}^n e_{Fl_i}; \sum_{i=1}^n e_{Fn_i}; \sum_{i=1}^n e_{Hs_i}; \right\}$$

Изложенные в [7] подходы к исследованию закономерностей функционирования природно-технических геосистем на высоком уровне обобщения дают общие представления о количественных соотношениях взаимодействия элементов ПТГ. Как неоднократно упоминалось выше, каждый вид промышленного техногенеза обладает свойственной ему спецификой воздействия на объекты природы, заключающейся в определенном распределении антропогенных изменений по качественному и количественному составу.

Для выработки эффективных мер предупреждения и разумного ограничения отрицательного техногенного воздействия на объекты природы необходимы специальные исследования по каждому отдельному влияющему фактору (или группе факторов) в отношении каждого составляющего элемента геосферы, отдельного вида биогео(гидро)ценозов, совокупности биогеоценозов природного ландшафта, геосферы в целом, а также общей экологической обстановки в регионе.

Обеспечение экологического прогноза предусматривает количественный подход как при оценке качества промышленного техногенеза, так и антропогенного изменения природного ландшафта на основе сбалансированной системы натуральных измерений. Решение этой задачи требует большого объема исходной информации, получаемой всеми имеющимися способами и средствами с участием учёных и специалистов различных направлений, в том числе промышленной санитарии и популяционной экологии.

Методологический анализ функционирования системы защиты водных объектов при авариях на нефтепроводах

Невозможность использования точных аналитических решений при планировании и оптимизации природоохранных структур для конкретных промышленных объектов и проблематичность получения всего спектра необходимых количественных данных по оценке взаимодействия элементов ПТГ [1, 7] выдвигает задачу разработки альтернативных методов, основанных на использовании системного подхода [4]. Оставаясь на позициях научно-методологических основ природоохранной деятельности, теоретическое обоснование которых связано с использованием функционала (4), необходимо разработать и обосновать логический ряд параметров и связывающих их зависимостей, которые описывают функционирование ПТГ и отвечают условиям функционала (4). При этом они должны быть доступны для практического использования при обосновании природоохранной деятельности на конкретном промышленном объекте.

Использование понятия ПТГ позволяет устанавливать зависимости между характером техногенеза и степенью антропогенных изменений экосистемы, которые рассматриваются как экологические потери. Для реальной экосистемы потенциальные (прогнозные) экологические потери являются функцией интегрального состояния (или качества) трудового процесса, а фактические потери - функцией характеристик техногенеза (или эксплуатационных свойств промышленного объекта). Определение вида этих функций является основной задачей настоящего исследования.

Для решения этой задачи необходимо получить зависимости, описывающие техногенез (качество трудового процесса или состояние промышленного объекта), экологическое состояние природного ландшафта, зависимости, описывающие воздействие технических объектов на компоненты ландшафта, и, что является итогом всей работы, функции, которые бы описывали зависимость между воздействием промышленного объекта и потерями в экосистеме.

Магистральные трубопроводы представляют собой промышленные объекты, обладающие потенциальной опасностью. Эта опасность существует на всех стадиях жизненного цикла трубопроводов (сооружение, эксплуатация, ремонты и реконструкции, ликвидация) и проявляется в разных сферах - экономической, социальной и экологической. Одна из наиболее серьёзных угроз в экологической сфере, которая исходит от магистральных трубопроводов, связана с авариями на магистральных нефте- и нефтепродуктопроводах (МНП) [4, 9, 10]. В [4] рассмотрена структурная схема модели взаимодействия аварийного МНП с водными объектами и указаны физические процессы, из которых состоит это взаимодействие. Теперь на основании научно-методологических подходов [7] необходимо выявить и обосновать факторы (параметры), которые присущи взаимодействию аварийного МНП с окружающей средой и определить зависимости, характеризующие это взаимодействие.

Территории, на которых функционируют МНП, также представляют собой природно-технические геосистемы. Формирование ПТГ, элементами которых являются МНП, связано с некоторыми особенностями нефтепроводов [4]:

- в безаварийный период эксплуатации МНП являются объектами с минимальным воздействием на природу. Серьёзные воздействия происходят только во время аварий, которые, естественно, являются случайными событиями;

- МНП являются линейными объектами, значительная часть которых проходит по территориям, где может быть расположено незначительное количество промышленных объектов, а чаще они отсутствуют полностью;

- разлившаяся нефть, попадая в водотоки, может по системе притоков проникать в русла крупных рек и распространяться на очень большие расстояния.

В соответствии с этим на территориях, прилегающих к трассам МНП, могут быть рассмотрены ПТГ, в состав которых входит только один промышленный объект (линейная часть МНП); потенциальное воздействие его на окружающую среду при авариях носит внезапный и интенсивный характер.

Для удобства дальнейшего рассмотрения механизмов взаимодействия аварийного МНП с геосистемой описание можно условно разделить элементы:

- определение интегрального состояния трудового процесса, т.е. зависимости вида $\Omega\left(\sum_{i=1}^n \omega_i\right)$;

- определение характеристик техногенеза (эксплуатационных свойств промышленного объекта) $\sum_{i=1}^n \omega_i$ и факторов, влияющих на значения этих характеристик;

- определение составляющих свойств интегральной характеристики ПТГ - $\sum_{i=1}^n e_i$ (по различным признакам);

- определение последствий (экологических потерь) от воздействия аварийного МНП.

В связи с присущей экосистемам многосвязностью разнохарактерных формирующих аргументов и проявлением свойства многофакторной корреляции количественное представление указанных зависимостей путём использования точных аналитических методов крайне затруднено [1,7].

В связи с этим предлагается рассмотреть неаналитические методы построения количественных соотношений, описывающих характер техногенеза, антропогенные изменения и экологические потери в ПТГ, находящихся под воздействием аварийного МНП.

Необходимо идентифицировать признаки состояния ПТГ, т.е. выделить те существенные признаки, которые присущи техническому объекту и геоландшафту. Эти существенные признаки являются факторами влияния на параметры, характеризующие взаимодействие всех элементов, входящих в состав природно-технической геосистемы.

В силу специфики исследуемой проблемы нас интересуют те характеристики МНП, которые описывают его как объект, способный войти в аварийное состояние. Другими словами, мы должны предста-

вить трубопровод в виде такой модели объекта, которая отображает возможность его отказа. Следовательно, нужно выявить факторы, влияющие на возможность возникновения аварии. Затем нужно установить количественное влияние (вес, вклад) каждого фактора на возможность появления аварии. Для каких-то факторов это количественное влияние можно представить в виде детерминированных зависимостей, для других - в виде стохастических функций, полученных на основе статистики, а есть факторы, влияние которых можно оценить только качественно. Всё это делает перспективу использования аналитических методов описания техногенеза МНП очень проблематичной и вынуждает искать другие пути. Другой путь - это описание МНП как модели, где в качестве аргументов выступают факторы влияния, а в качестве функции - риск разгерметизации трубопровода с образованием отверстия с характерным размером.

В данном случае количественный подход при оценке качества промышленного техногенеза - это оценка состояния трубопровода с точки зрения обеспечения его надёжности, которая осуществляется путём выявления факторов влияния на вероятность разгерметизации. В обобщённом виде количественное представление качества промышленного техногенеза состоит в оценке риска разгерметизации с образованием дефектного отверстия с характерным размером.

Если рассматривать взаимодействие МНП с геоландшафтом только в аварийных ситуациях, то оно сводится к воздействию одного техногенного фактора - разлившейся нефти co_r . Действием этого фактора определяется вся совокупность взаимодействия аварийного МНП с геоландшафтом и в итоге - характер экологических последствий. Необходимо установить зависимости, которые бы определяли количественные характеристики этого фактора. Возникновение разлива нефти на линейной части МНП происходит в результате разгерметизации трубопровода. Это событие носит стохастический характер. Вероятность разгерметизации зависит от большого числа факторов влияния, которые имеют разную природу и распределены по однородным группам: внешние антропогенные воздействия; коррозия; качество производства труб; качество строительно-монтажных работ; конструктивно-технологические факторы; природные воздействия; эксплуатационные факторы; дефекты тела труб и сварных швов. Функция вероятности разгерметизации на конкретном участке МНП [10, 11]

$$\lambda_n = f(F_n) = f\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} \rho_i q_j B_{ij}\right),$$

где λ_n - вероятность разгерметизации на конкретном участке МНП; F_n - фактор влияния на вероятность разгерметизации; ρ_i - весовой коэффициент i -той группы факторов; q_j - весовой коэффициент j -того фактора в i -той группе; B_{ij} - балльная оценка j -того фактора в i -той группе.

Эта зависимость по терминологии [7] является функцией интегрального состояния (или качества) трудового процесса.

Наступление стохастического события - разгерметизации трубопровода вызывает разлив нефти, однако количественные параметры этого разлива (V - общий объём разлившейся нефти) зависят от ряда параметров [10, 12] и в общем виде могут быть представлены в виде функционала

$$V = \begin{cases} \text{Оте} \left[\left(R_{om} = \lambda_n \gamma_{m_i}^L \right) \right] \\ \text{Тех} \left[V_{m_i} = f(p_k) \right] \\ \text{Гео} \left[\left[V_{z_i} = \phi(z_i), V_{l_i} = \psi(l_i) \right] \right] \\ \text{Обн} \left[V_{\tau_i} = \varphi(\tau_i) \right] \end{cases} \quad (6)$$

где $\text{Оте} [..]$ - функция, определяющая риск R_{om} разгерметизации с появлением дефектного отверстия характерного размера, $\gamma_{m_i}^L$ - весовой коэффициент дефектного отверстия с характерным размером L ;

$\text{Тех} [..]$ - функции, определяющие зависимость объёма разлившейся нефти от технологического режима перекачки в момент аварии; $f(p_k)$ - функции, характеризующие значения давления в трубопроводе;

$\text{Гео} [..]$ - функции, определяющие влияние профиля трассы (геодезических характеристик - z_i) и расположения задвижек (l) на объём разлившейся нефти; $\text{Обн} [..]$ - функции, определяющие влияние эффективности системы обнаружения утечек и быстрого действия механизмов закрытия задвижек τ_i на объём разлившейся нефти.

Объём разлившейся нефти через отверстия определённого размера является детерминированной зависимостью. На объём разлившейся нефти, помимо параметров режима перекачки в момент аварии, эффективности технических систем защиты от утечек, свойств нефти и других технологических факторов заметное влияние оказывает профиль трассы, что зависит от особенностей ландшафта в районе аварии. Определение объёма разлившейся нефти в каждой точке трассы на основании детерминированных зависимостей не вызывает принципиальных трудностей [12]. Это позволяет для каждой точки трассы определять риск разлива определённого количества нефти. Таким образом, мера воздействия аварийного МНП в данной точке трассы количественно определяется индексом риска разлива определённого количества нефти

$$R_{pn} = R_{om} V \quad (7)$$

Следует отметить, что определение интегрального состояния трудового процесса, т.е. зависимости вида $\Omega \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \right)$ не представляет принципиальных трудностей, однако требует учёта большого количества факторов влияния, имеющих различную природу: детерминированных, недетерминированных и качественных. Для случая аварийного МНП эта зависимость может принимать форму (7).

Мишенью воздействия разлившейся нефти являются все компоненты геоландшафта. Однако, как показывает анализ физических процессов, сопровождающих взаимодействие этих компонентов с разлившейся нефтью [4], от свойств (признаков) элементов геоландшафта зависит не только характер экологических изменений этих свойств, но и распределение долей разлившейся нефти между компонентами геоландшафта, а также характер физических механизмов воздействия разлившейся нефти на объекты геоландшафта. Например, в зависимости от впитывающей способности грунта и уклона поверхности земли на участках трассы, расположенных вблизи водных объектов, будут меняться доли разлившейся нефти, которые останутся на земле (загрязнят грунт) и попадут в водный объект. Аналогичное влияние оказывает расстояние от места разгерметизации трубопровода до водного объекта, если характер местности позволяет нефти по рельефу стекать в водный объект.

Согласно (5 б) экологические последствия от антропогенного воздействия техногенеза на геосферу ПТГ определяется в виде суммарного учёта всех свойств ПТГ e_i . Известно [4], что потенциальное антропогенное воздействие аварийного МНП вызывает наиболее тяжёлые последствия в гидросфере. Кроме того, многофакторный характер процессов, которые происходят в ПТГ под воздействием техногенных факторов, неоднозначность внутренних связей типа $\omega_i \rightarrow e_i$; $\omega_{i-1} \rightarrow \omega_i$; $e_{i-1} \rightarrow e_i$ и т.д. не позволяют точно осуществлять комплексную оценку и прогнозирование интегральных характеристик $\varepsilon_{ПТГ}(t)$

Поэтому оправданно воздействие на всю геосистему ПТГ свести только к воздействию на гидросферу, пренебрегая на данном этапе исследования взаимным влиянием других компонентов геосферы. В этом случае выражения (5 а) и (5 б) принимают вид

$$\varepsilon_0 \left(\sum_{i=1}^n e_{G_{0i}} \right) \rightarrow \varepsilon_{ПТГ} \left(\sum_{i=1}^n e_{G_{mi}} \right) \quad (8)$$

и формально (8) можно рассматривать как частный случай (5).

Ограничив всю совокупность элементов геосистемы ПТГ гидросферой, необходимо установить группу показателей свойств гидросферы (в частности, для поверхностных водных объектов суши - водотоков и водоёмов по ГОСТ 17.1.1.02.-77 [13]). Необходимо установить, на какие показатели экологического состояния этих объектов действует разлившаяся нефть и как изменяются значения этих показателей.

Однако сложность решения этого вопроса является основной причиной ограничения непосредственного использования подходов, изложенных в [7]. С точки зрения практической целесообразности, рассмотрение этого вопроса должно осуществляться в контексте построения такой цепочки зависимостей: *антропогенное воздействие* \rightarrow *изменение характеристик элемента геоландшафта* \rightarrow *экологические последствия* \rightarrow *ущерб*. Выполнение этой работы требует использования сбалансированной системы натуральных измерений, для чего требуется привлечение большого объёма исходной информации, получаемой всеми имеющимися способами и средствами широким кругом учёных и специалистов разных направлений, прежде всего, в области популяционной экологии и промышленной санитарии.

Альтернативой оценке влияния техногенеза аварийных трубопроводов на экологическое состояние водных объектов на основе учёта изменений по всей номенклатуре их совокупных свойств (8) может явиться опосредованная оценка через величину ущерба от загрязнения водного объекта. Проведя количественную оценку экологических последствий загрязнения водных объектов при авариях на МНП путём ис-

пользования значения ущерба $V_{го}$, можно определить риск R_y экономического ущерба от загрязнения водных участков для участка трассы

$$R_y = R_{рн} V_{го} = R_{от} VY_{го} \quad (9)$$

Следует заметить, что зависимость (9) соответствует функционалу (4) применительно к рассматриваемому случаю ПТГ.

Таким образом, предлагается общий методологический подход, который позволяет интегрально оценивать экологические последствия уже в том виде, как его воспринимает общество (через нормативные методики оценки ущерба). Эффективность этого подхода определяется качеством методик экономической оценки экологического ущерба. При этом можно пользоваться нормативными методиками, которые дают довольно грубую оценку экономического ущерба с точки зрения учёта всех показателей экологического состояния. Эти методики необходимо совершенствовать, повышая их точность за счёт полноты учёта показателей экологического состояния природного объекта.

Переход на оценку последствий через учёт ущерба и введение экономического показателя в качестве меры экологических последствий имеет ещё одно важное методологическое достоинство. Оно 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. Это облегчает создание экономических механизмов подавления деятельности предприятий, которые выходят за рамки существующих нормативов (расчёт ущерба и соответствующие штрафы), и поощрение предприятий, экологическая деятельность которых улучшается. Конечно, переход к экономической оценке экологических последствий правомерен лишь в определённой области деятельности (анализ, прогноз и т. п.).

Поскольку в рассматриваемом подходе техногенез аварийного нефтепровода представлен в виде стохастической зависимости (7), то и экологические последствия должны быть оценены как недетерминированная величина [10, 11].

Использование при прогнозировании в качестве оценки экологических последствий аварий на МНП значений экономического ущерба от загрязнения водных объектов даёт, с точки зрения учёта полноты экологических последствий, очень грубый результат. Это объясняется тем, что признаками экологического состояния водного объекта выступают те его характеристики, которые учитываются в нормативных методиках по определению ущерба. Этот недостаток может быть частично устранён в дальнейшем при совершенствовании методик оценки ущерба в направлении повышения полноты учёта факторов, влияющих на экологические последствия загрязнения водных объектов.

Полноту учёта факторов, влияющих на экологические последствия загрязнения водных объектов, можно обеспечить, если при оценке экологических последствий загрязнения водных объектов при аварии на МНП осуществлять непосредственный учёт всех существенных факторов. Для этого необходимо выявить эти факторы, распределить их по однородным группам и присвоить каждому фактору значения весовых коэффициентов и баллов [11, 14].

Ранжирование линейной части МНП на участки производится по каждому отдельному фактору влияния на последствия аварии. Балльная оценка возможных последствий от аварии Q рассчитывается для каждого участка трассы. Диапазон изменения и вклад каждого фактора в обобщённую балльную оценку определяются путем суммирования балльных оценок каждого фактора с помощью «весовых коэффициентов»

$$Q = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} \rho_i \cdot q_{i,j} \cdot Q_{i,j} \quad (10)$$

где $Q_{i,j}$ – балльная оценка фактора возможных последствий от аварии; I – количество групп факторов; $J(i)$ – количество факторов в i -той группе; ρ_i – весовой коэффициент группы факторов; $q_{i,j}$ – весовой коэффициент фактора.

Определение экологических последствий загрязнения водных объектов при авариях на МНП, квантифицированных баллами, позволяет осуществлять учёт всех существенных свойств (признаков) геосистемы. Расчёт значений индекса риска с учётом балльной оценки экологических последствий проводится по зависимостям, аналогичным (9), в которых вместо ущербов используются балльные оценки последствий.

Выводы

Рассмотрены общие подходы к исследованию взаимодействия элементов промышленных экосистем и показаны основные соотношения, связывающие эти элементы. Отмечено, что промышленные экосистемы обладают высокой степенью сложности, обусловленной невозможностью строгого математического описания, многозвенностью структурного состава и многосвязностью составляющих элементов. Это вызывает необходимость использования при исследовании промышленных экосистем комплексного рассмотрения проблемы, что позволяет взаимоувязывать в единой методологической основе детерминированный и стохастический подходы.

Предложен альтернативный аналитическим методам проведения исследований промышленных экосистем метод исследования количественных зависимостей влияния техногенеза на изменение экологических характеристик геоландшафта, основанный на использовании оценки ущерба, как интегрального показателя экологических последствий. Указаны достоинства и недостатки этого метода и область его использования.

Показано, что при существующем уровне возможностей экологического прогноза на основе сбалансированной системы натуральных измерений наиболее полный учёт существенных факторов влияния на изменения экологических свойств промышленных геосистем обеспечивается путём весовой оценки этих факторов.

Рекомендовано использование риск-анализа в качестве эффективного метода построения количественных зависимостей, характеризующих промышленные экосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измалков В.И., Измалков А.В. Техногенная и экологическая безопасность и управление риском. - СПб., НИЦЭБ РАН, 1998. - 482 с.
2. Зубаков В. XXI век. Сценарии будущего: анализ последствий глобального экологического кризиса. // Зелёный мир. - № 9. - 1996.
3. Наше общее будущее. (Доклад Международной комиссии по окружающей среде и развитию - МКОСР). - М.: Прогресс, 1989.
4. Липский В.К. Система защиты водных объектов от загрязнения при авариях на магистральных нефтепроводах Беларуси. // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. - Т. 1, № 2. - Новополоцк: ПГУ, 2002. - С. 3 - 16.
5. Липский В.К. Генезис, структура и методологические аспекты проблемы защиты водных объектов при авариях на нефтепроводах. Сб. науч. тр. Вып. 2. - Новополоцк: ПГУ, 2002. - С. 136 - 146.
6. Коптюг В.А. Конференция ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, июнь 1992 г.). - Информ. обзор, РАН, Сибирское отделение, 1993. - 63 с.
7. Мазур И.И., Молдаванов О.И. Введение в инженерную экологию. - М.: Наука, 1989. - 375 с.
8. Концепция национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь // Национальная комиссия по устойчивому развитию Республики Беларусь. - Минск: ООО «Белсэнс», 1997. - 48 с.
9. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность трубопроводного транспорта. - М.: МГФ «Знание», 2002. - 752 с.
10. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах: Сер. 27. Вып. 1 / Коллектив авторов. - М.: Гос. предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности» Госгортехнадзора России, 2000. - 96 с.
11. Липский В.К., Вегера А.И., Кульбей А.Г., Криволапов А.В. Балльная оценка возможных последствий аварий на нефтепроводах. Сб науч. тр. Вып. 3. - Новополоцк: ПГУ, 2003. - С. 148 -160.
12. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах. Руководящий документ Минтопэнерго РФ, АК «Транснефть». - М., 1995.
13. ГОСТ 17.1.1.02-77. Охрана природы. Гидросфера. Классификация водных объектов.
14. РД 153-39-029-98. Нормы периодичности обследования магистральных трубопроводов внутритрубами инспекционными снарядами. - М.: АК «Транснефть», ОАО ЦТД «Диаскан», 1998.