

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПРИЕМЛЕМОСТИ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Интенсивное развитие в последнее десятилетие методов качественного и количественного анализа риска оказало положительное влияние на отечественную законо- и нормотворческую работу. В федеральном законодательстве на основе процедуры анализа риска успешно внедрен и продолжает развиваться путь от декларации безопасности [1,2] до технического регламента [3]. В этих и других отечественных законах [например, 4,5], а также в нормативных документах [6-11] не только регламентируется порядок применения процедуры анализа риска на практике, но и во многом обозначен подход к менеджменту техногенного риска как эффективному этапу в управлении процессом обеспечения безопасности в техносфере.

Цель данной статьи – обсудить возможность создания и использования на практике довольно общей процедуры *оценивания* техногенного риска [8], т.е. сравнения его прогнозируемых или реально достигнутых количественных показателей с соответствующими критериями в целях принятия решений о приемлемости риска и необходимости вмешательства в процесс обеспечения безопасности.

### **Исходные предпосылки и категории**

Системный подход к оцениванию степени приемлемости техногенного риска, как составной части риск-менеджмента на опасных производственных объектах (ОПО), может базироваться на следующих, довольно универсальных исходных понятиях и п р е д п о с ы л к а х:

а) опасность правомерно рассматривать как возможность причинения ущерба кому (чему)-либо от чего- (кого)-нибудь, а безопасность – как атрибут гарантированного сохранения живучести системы, включающей в себя не менее одного источника опасности (носителя какой-либо угрозы) и его потенциальной жертвы (объекта возможного причинения ущерба);

б) производственную деятельность человека удобно интерпретировать в виде функционирования соответствующих человекомашинных систем, опасность которых обусловлена стремлением таких систем к динамическому равновесию и возможностью нахождения их компонентов в неравновесных состояниях;

в) измеряемая риском опасность функционирования человекомашинных систем, реализуется при возникновении в них происшествий, которые сопровождаются

значительным приростом энтропии этих систем в ее информационной, статистической и термодинамической интерпретациях.

Исходя из этого можно считать, что объектом оценивания степени приемлемости техногенного риска должны быть системы «человек–машина–среда» (ЧМС), входящие в состав различных типов ОПО, а предметом соответствующей деятельности – использование объективных закономерностей возникновения и снижения техногенного ущерба в целях:

1) выявления вклада в эти закономерности разных частей ЧМС систем для устранения или усиления их «слабых» (в смысле безопасности) элементов;

2) априорной количественной оценки риска ущерба от техногенных происшествий (техногенного риска) и сравнения его величины с заданным или желаемым (приемлемым) значением;

3) оценки необходимости в реализации управляющих воздействий, направленных на снижение или поддержание техногенного риска на приемлемом уровне.

Обоснованность выбора ЧМС системы в качестве объекта при оценивании приемлемости техногенного риска аргументирована также следующими доводами:

а) данная система включает в себя и источник опасности (обычно – это «машина»), и потенциальную жертву (чаще всего – «человек» и/или окружающая его «среда»);

б) функционирование ЧМС системы есть использование человеком техники в определенной рабочей среде (безлюдные и не использующие технику процессы – частные случаи);

в) в ЧМС системе содержатся носители всех типов предпосылок к техногенным происшествиям: «человек» – ошибок, «машина» – отказов, «среда» – нерасчетных (неожиданных или превышающих допустимые пределы) внешних воздействий.

Наиболее общая модель функционирования выбранного объекта представлена на Рис. 1, которая включает в себя технологическое оборудование ОПО («М-машину»), эксплуатирующий его персонал («Ч-человека»), рабочую среду («С-среду»), взаимодействующих между собой по заданной технологии и при установленной организации (порядке подготовки и проведения) работ – «Т-технология». Кроме перечисленных основных компонентов модель системы включает также связи между ними и с окружающей систему средой. Эти связи изображены стрелками, двойными линиями и соприкосновением перечисленных частей системы, а границы, отделяющие ее от внешней среды, – прямоугольником.

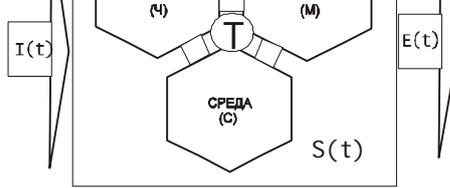


Рис. 1. Модель ЧМС как объекта оценивания техногенного риска

В модели функционирования выбранного объекта использованы также векторные обозначения:  $I(t)$  – входные воздействия на ЧМС систему (выделенные ресурсы, требуемые условия работ, заданные функции, установленные интервалы времени),  $S(t)$  – ее состояния («условно безопасное», «опасное», «предаварийное», «аварийное», «поставарийное»),  $E(t)$  – выходные воздействия системы на окружающую среду (полезные и вредные результаты функционирования). При этом проводимые на ОПО технологические процессы могут быть декомпозированы на соответствующие операции, каждая из которых интерпретируется функционированием ЧМС системы по конкретной технологии.

*Внешней* (для конкретной ЧМС системы) средой является все то, что непосредственно не входит в нее, но может влиять на процесс функционирования или изменяться под его воздействием: органы и коммуникации снабжения, управления и получения продукции, другие взаимодействующие силы и средства, а также метеорологические и иные внешние факторы в месте дислокации ОПО. Необходимость отделения рабочей среды от внешней обусловлена необходимостью учета неодинаковости их влияния на функционирование различных ЧМС систем, выбранных в качестве объекта оценивания приемлемости техногенного риска.

Изложенные предпосылки позволяют ввести пять базовых категорий, связанных с оцениванием степени приемлемости риска и обеспечением безопасности ОПО техногенного характера, а также дать их рабочие определения:

*Опасность* – свойство ЧМС системы, определяющее при ее функционировании возможность причинения ущерба людским, материальным и природным ресурсам по причине внезапных и непрерывных выбросов, обращающихся в системе энергии и вещества.

*Ущерб* – мера или результат изменения состояния материальных объектов, характеризуемого таким нарушением целостности или иным ухудшением способности выполнять основное предназначение, которые обусловлены их естественным износом либо возникновением происшествий.

*Происшествие* – событие, повлекшее появление ущерба вследствие резкого изменения свойств материальных объектов и/или их окружения и обусловленное разрушительным воздействием потоков энергии или вещества на незащищенные элементы ЧМС системы и/или окружающую среду. К основным видам техногенных происшествий относятся: авария, несчастный случай, разлив нефти и нефтепродуктов, пожар, сверхнормативное загрязнение окружающей среды, техногенная чрезвычайная ситуация (ЧС) и др.

*Безопасность* – свойство ЧМС системы сохранять при функционировании в заданных условиях такие состояния, при которых с приемлемой (достаточно высо-

кой) вероятностью исключаются происшествия, а ущерб от непрерывных выбросов обращающихся в системе энергии и вещества не превышает допустимого.

*Риск* – мера опасности, характеризующая как возможность (вероятность) причинения техногенного ущерба, так и его величину (тяжесть).

### **Показатели техногенного риска и способы их прогноза**

Важное место в количественном прогнозе и оценке приемлемости техногенного риска, связанного с созданием, эксплуатацией и ликвидацией ОПО, принадлежит не только соответствующим методам прогноза и оценки, но и выбираемым количественным показателям. При этом обоснование состава таких показателей должно проводиться с учетом следующих основных требований:

- а) четкий физический смысл и универсальность,
- б) связь с качеством и продолжительностью функционирования ЧМС системы,
- в) учет всех существенных свойств ее основных компонентов,
- г) чувствительность к изменению параметров каждого из них,
- д) возможность оценки объективными методами,
- е) пригодность к использованию в качестве оптимизируемых параметров, ограничений и критериев оптимизации.

Принимая во внимание приведенные соображения, **б а з о в ы м** показателем, наиболее полно характеризующим меру опасности ОПО и пригодным для эффективного риск-менеджмента на ОПО, может служить математическое ожидание  $M_{\tau}[Y]$  величины социально-экономического ущерба техногенного характера от возможных в течение заданного времени  $\tau$  происшествий и непрерывных вредных выбросов. В качестве *других* показателей, необходимых для оценки результативности функционирования как системы обеспечения безопасности ОПО, так и менеджмента риска, могут быть следующие:

$Q(\tau)$  – вероятность возникновения хотя бы одного происшествия конкретного типа (авария, несчастный случай и др.) за время  $\tau$ ,

$M_{\tau}[Z]$  – ожидаемые средние задержки времени приостановки технологического процесса на ОПО вследствие возможных происшествий;

$M_{\tau}[S]$  – ожидаемые в это же время средние затраты на предупреждение и снижение тяжести происшествий и непрерывных вредных выбросов.

Учитывая массовый характер проведения однотипных процессов на ОПО, а также достаточно развитую систему сбора информации об аварийности и травматизме, использование выбранных показателей для апостериорной количественной оценки техногенного риска и принятия решения о степени его приемлемости, как правило, не вызывает принципиальных трудностей. Для этого достаточно регистрировать а) интенсивность и длительность проводимых процессов, б) расходы и трудозатраты на обеспечение безопасности, в) количество и тяжесть имевших ме-

сто происшествий, и затем проводить расчеты по статистическому оцениванию выбранных показателей и сравнивать с их требуемыми или желаемыми значениями.

Значительно сложнее проводить *априорную* оценку предложенных показателей, поскольку это требует комплекса моделей, связывающих выбранные показатели не только с параметрами конкретных ЧМС систем, но и окружающей их внешней средой. Для преодоления этих трудностей иногда целесообразно оперировать понятием "средний ожидаемый ущерб" от техногенного происшествия конкретного типа за определенное время эксплуатации ОПО. С учетом подобных допущений, величина среднего ожидаемого ущерба людским, материальным и природным ресурсам за некоторый период времени  $\tau$  эксплуатации ОПО, может быть оценена по следующей формуле (по «источнику опасности»):

$$R_{\tau} = M_{\tau}[Y] = \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^k Q_{ab}^I Y_{ab}^I + \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^k Q_{ab}^{II} Y_{ab}^{II} + \sum_{v=1}^n Q_v Y_v \quad (1)$$

где:  $a=1\dots m$  – число типов возможных техногенных происшествий: авария ( $a=1$ ), несчастный случай ( $a=2$ ), пожар ( $a=3$ ) т.д. - форм причинения прямого и косвенного ущерба людским, материальным и природным ресурсам;

$b=1\dots k$  – число предполагаемых сценариев возникновения и развития различных типов происшествия;

$Q_{ab}^I, Y_{ab}^I$  и  $Q_{ab}^{II}, Y_{ab}^{II}$  – вероятность возникновения за время  $\tau$  происшествия конкретного вида и размер обусловленного им прямого (I) и косвенного (II) ущерба соответственно;

$v=1\dots n$  – число видов непрерывных и/или систематических вредных энергетических (шум, вибрация, электромагнитный излучения...) и материальных (загрязняющие вещества, отходы ...) выбросов при эксплуатации ОПО;

$Q_v, Y_v$  – вероятности появления за время  $\tau$  каждого типа непрерывных или систематических вредных выбросов и размеры возможного от них прямого и косвенного ущерба.

В основе другого способа приближенного прогноза среднего ожидаемого ущерба техногенного характера при эксплуатации ОПО лежит рассмотрение возможных зон поражения (объемов пространства или площадей поверхности), в пределах которых располагаются не защищенные людские, материальные и природные ресурсы. Это позволяет оценивать техногенный риск по следующей формуле (по «потенциальным жертвам»):

$$R_{\tau} = M_{\tau}[Y] = \sum_{l=1}^3 (Q_l^I \cdot \Pi_l^Q \cdot F_l \cdot S_l) + \sum_{l=1}^3 (\Pi_l \cdot F_l \cdot S_l) + \sum_{v=1}^n Q_v Y_v + \sum_{l=1}^3 Q_l^{II} \cdot Y_l^{II} \quad (2)$$

где  $Q_l^I$  – вероятность причинения людским ( $l=1$ ), материальным ( $l=2$ ) и природным ( $l=3$ ) ресурсам прямого (I) ущерба заданной степени тяжести за время  $\tau$ ;

$\Pi_i^o, \Pi_i$  – соответственно площади/объемы зон вероятного и достоверного причинения ущерба людским, материальным и природным ресурсам поражающими факторами внезапных и непрерывных выбросов энергии и/или вещества;

$F_i, S_i$  – средние плотность и стоимость единицы каждого ресурса в зонах вероятного и достоверного причинения ущерба;

$Q_i^{\Pi}, Y_i^{\Pi}$  – вероятность возникновения косвенного ( $\Pi$ ) ущерба вследствие появления происшествия конкретного типа за время  $\tau$  и возможные средние размеры этого ущерба.

Для прогнозирования параметров каждой из этих двух формул необходимо использование совокупности дополнительных моделей и методов, которые с определенной условностью могут быть разделены на три довольно крупных класса.

1. Логико-вероятностные модели, интерпретирующие различные варианты возникновения и развития происшествий в виде диаграмм причинно-следственных связей типа «дерево» («дерево отказа», «дерево событий»), «граф» (поточковый либо состояний и переходов), «сеть» (стохастической структуры – К. Петри или GERT). После дальнейшей формализации они позволяют получать математические соотношения (структурные функции алгебры событий и расчетные вероятностные многочлены), удобные для проведения системного анализа процесса возникновения техногенного ущерба и прогноза техногенного риска (подробнее см. [12]).

2. Аналитические модели: а) параметрические формулы типа полуэмпирического уравнения М. Садовского для перепада давлений в атмосфере или гауссова модель рассеяния в ней вредных веществ; б) интегральные модели, базирующиеся на законах сохранения массы и энергии, и описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями; в) модели, построенные на представлении параметров состояния или энергомассообмена в их оригинальном виде и реализуемые системами дифференциальных уравнений в частных производных.

3. Методы логико-лингвистического, имитационного, статистического и численного моделирования, основанные на использовании случайных (в том числе, нечетко определенных) распределений параметров совокупности различных моделей и учете непрерывно меняющихся факторов ЧМС систем и окружающей их среды.

С точки зрения предназначения или области применения, вышеперечисленные модели и методы могут быть распределены по пяти основным этапам причинения техногенного ущерба: 1) возникновение и развитие причинной цепи предпосылок происшествия, необходимых и достаточных для начала неконтролируемого выброса энергии и/или вещества; 2) истечение, 3) распространение и 4) трансформация соответствующих потоков энергии и/или вещества в окружающей среде, 5) воздействие поражающих факторов, обусловленных неконтролируемым выбросом энергии и/или вещества, на незащищенные людские, материальные и природные ресурсы.

Наибольший практический интерес для прогноза риска аварий на ОПО представляют модели: а) образования причинной цепи предпосылок аварии, б) источника выброса опасного вещества, в) истечения газообразных, жидких или двухфазных опасных веществ; г) распространения энергии и массы в несущей среде или растекание и межсредный перенос опасного вещества; д) вскипания сжиженного газа или перегретой жидкости, е) физико-химического превращения опасных веществ с интенсивным энерговыделением и образованием полей поражающих факторов; ж) реципиентов поражающих факторов; з) поражения вида «доза-эффект».

### Концепция оценки приемлемости риска

Пригодные для оценивания степени *приемлемости* техногенного риска критерии<sup>1</sup> и методы могут быть позаимствованы из математической статистики и математической теории организации [13]. Исходя из наиболее полного (интегрального) представления техногенного риска  $R_t$  в виде ожидаемого среднего ущерба  $M_t[Y]$ , наиболее целесообразным способом принятия решения о приемлемости следовало бы считать соблюдение условия о «накрытии» (с выбранной доверительной вероятностью  $\gamma$ ) интервальной оценкой  $[R_H, R_B]_\gamma$  случайной величины  $R_t$ , найденной по формулам (1) или (2), заданного или желаемого ее значения  $R_t^*$ .

Однако, вследствие достаточно большой дисперсии прогнозных значений  $R_t$ , измеряемой в настоящее время несколькими арифметическими порядками [18, 17], обоснованность такого решения вряд ли можно признать удовлетворительной. Дело в том, что стандартный доверительный интервал  $[R_H, R_B]_{\gamma=0,9}$  также будет оцениваться этими же арифметическими порядками, а потому и «накроет» все значения  $R_t^*$  из столь широкого диапазона, что совершенно недопустимо из-за низкой степени достоверности тех решений о приемлемости риска, которые могут быть приняты на основе найденных оценок  $M_t[Y]$ .

Учитывая данное обстоятельство, при принятии решений о степени приемлемости техногенного риска предлагается оперировать не интервальными оценками ожидаемого среднего ущерба  $M_t[Y]$ , а доверительными интервалами  $[Q_H, Q_B]_\gamma$  влияющих на него вероятностей:  $Q_{ab}^1$  – появления заранее оговоренных, как правило, наиболее крупных или типичных, происшествий, а также  $Q_i^1$  – причинения при эксплуатации ОПО прямого ущерба конкретной тяжести (например, вероятность гибели человека от аварий, вероятность аварийного разлива нефти от 500 до 1000 т и т.п.). Подобный подход используется в области обеспечения безопасности атомных станции (согласно [15] вероятность тяжелых запроектных аварий не должна превышать  $10^{-7}$  на реактор в год), а также, не вполне корректно, в области обеспечения пожарной безопасности технологических процессов (согласно [11], вероятность поражения более 10 человек поражающими воздействиям пожара и взрыва

---

<sup>1</sup> Здесь имеются в виду введенные выше количественные показатели, используемые с одним из следующих условий: «не меньше, чем...», «не больше, чем...» и «принадлежит диапазону [\*,\*]».

не должна превышать  $10^{-5}$ ) и промышленной безопасности отдельных типов ОПО («технические решения при проектировании объектов СУГ должны обеспечивать уровень индивидуального риска возможных аварий при эксплуатации ОПО не более величины  $10^{-6}$ » [16]). Отметим, что практическая ценность нормирования техногенного риска в двух последних случаях весьма сомнительна, т.к. данные критерии беспредметны и в них полностью неопределенны как временные рамки, так и собственно сами рассматриваемые неблагоприятные события. Подробное рассмотрение вопроса о принципах обоснованного установления количественных значений критериев приемлемости техногенного риска выходит за рамки настоящей статьи.

Дополнительным способом уменьшения дисперсии и сужения доверительных интервалов  $[R_H, R_B]_\gamma$  и  $[Q_H, Q_B]_\gamma$  может служить введение требования об использовании при оценке техногенного риска минимально необходимого набора методов и методик с четким и однозначным алгоритмом их применения (подобное реализовано, например, в [7], и в общих чертах в [11]). Оценка техногенного риска в этом случае необходимо проводить с соблюдением «трех единств», т.е. по одной методике, одной и той же рабочей группой и при одном и том же источнике постулируемых исходных данных.

Предпочтительность принятия статистических решений на основе вероятностей происшествий с детерминированным ущербом обусловлена тем что: а) стандартные доверительные интервалы  $[Q_H, Q_B]_\gamma$  в сотни раз меньше  $[R_H, R_B]_\gamma$ , б) нормирование техногенного риска путем обоснования приемлемой вероятности  $Q^*(\tau)$  появления происшествий, а не величины причинения ущерба от них, оказывается более строгим и легче воспринимается обществом.

Особо подчеркнем, что предлагаемый авторами способ оценивания техногенного риска по критериям допустимой вероятности происшествий конкретного типа на определенных объектах  $Q^*(\tau)$ , а не социально-приемлемого ущерба  $M_\tau[Y]$  от них, не исключает целесообразности заблаговременного прогноза величины последнего. Напротив, использование полученных при этом результатов позволяет оптимизировать менеджмент техногенного риска, несмотря на невысокую достоверность его прогноза в данном случае. А достигается последнее использованием не абсолютных значений подобных оценок, а того более достоверного прогноза их изменения  $\Delta M_\tau[Y]$ , которое ожидается от совершенствования качества соответствующих ЧМС вследствие внедрения мероприятий (мер обеспечения безопасности), улучшающих их свойства на величину  $\Delta Ч, \Delta М, \Delta С$  и/или  $\Delta Т$ .

Общая схема соответствующей расчетно-оптимизационной процедуры будет следующей:  $\Delta Ч, \Delta М, \Delta С, \Delta Т \rightarrow \{\Delta Q_{ab}^1(\Delta Ч, \Delta М, \Delta С, \Delta Т) \text{ и/или } \Delta Q_i^1(\Delta Ч, \Delta М, \Delta С, \Delta Т)\} \rightarrow \Delta M_\tau[Y](\Delta Q_{ab}^1 \text{ и/или } \Delta Q_i^1)$ . При этом наиболее предпочтительными будут те из предлагаемых мероприятий, которые соответствуют: а) наибольшему (при выделенных затратах  $S^*$ ) снижению либо вероятностей появления происшествий –

$\Delta Q_{ab}^1$  и/или  $\Delta Q_i^1$ , либо ожидаемого от них среднего ущерба –  $\Delta M_i/[Y]$ ; б) наименьшим затратам  $S(\Delta Ч, \Delta М, \Delta С, \Delta Т)$  на внедрение таких мероприятий с целью получения требуемого от них эффекта (снижения риска до приемлемого уровня) [14].

\* \* \*

В заключение отметим, что предложенная авторами концепция прогноза, оценивания и оптимизации техногенного риска предполагает возможность его менеджмента двумя заинтересованными сторонами. Первая представляет организации, осуществляющие эксплуатацию ОПО, и органы надзора за имеющимися на них источниками техногенных угроз, а вторая – обеспечивает гражданскую защиту их потенциальных жертв, т.е. осведомленность и подготовленность проживающего вблизи населения к техногенным ЧС.

В целях гармонизации и взаимного дополнения совместных усилий по обеспечению безопасности в техносфере, представляется целесообразным разработка обобщенной процедуры программно-целевого менеджмента техногенного риска в промышленности и на транспорте. Этому может способствовать и высказанная здесь точка зрения. Допустим, – путем всестороннего обсуждения на страницах журнала проекта соответствующей методики или другого нормативного документа, регламентирующего управление процессом обеспечения промышленной безопасности как составной части безопасности национальной.

## Литература

1. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.7.1997 N 116-ФЗ
2. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 21.7.1997 N 117-ФЗ
3. Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.2002 года N 184-ФЗ
4. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.1.2002 N 7-ФЗ
5. Федеральный закон «О газоснабжении в Российской Федерации» от 31.3.1999 N 69-ФЗ
6. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов (утв. пост. Госгортехнадзора России от 10.07.01 №30)
7. РД «Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах». Утв. ОАО «АК «Транснефть», пр. от 30.12.99 № 152, согл. Госгортехнадзором России 07.07.99 №10-03/418.
8. ГОСТ Р 51897-2002. Менеджмент риска. Термины и определения.
9. ГОСТ Р 51901-2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем.
10. ГОСТ Р 27.310-95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения
11. ГОСТ Р 12.3.047-98. ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля
12. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. М. Академия. 2003 . – 512 с.
13. *Drenick K.* A mathematical theory of organization. Acad. Press. 1986. – 340 p.
14. Гражданкин А.И., Белов П.Г. Экспертная система оценки техногенного риска опасных производственных объектов//Безопасность труда в промышленности. – 2000. - №11. - С.6-10.
15. ОПБ-88/97. «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (утв. Госатомнадзором России)
16. ПБ 12-609-03. Правила безопасности для объектов, использующих сжиженные углеводородные газы. (утв. пост. Госгортехнадзора России от 27.05.03 №40, зарег. Минюстом России 19.06.03 №4777)
17. *S. Gadd, D. Keeley, H. Balmforth.* Good practice and pitfalls in risk assessment. – Health & Safety Laboratory. – Research Report 151. – HSE Book. – 2003
18. *Lauridsen, K.; Kozine, I.; Markert, F.; Amendola, A.; Christou, M.; Fiori, M.,* Assessment of uncertainties in risk analysis of chemical establishments. The ASSURANCE project. Final summary report. Ris0-R-1344(EN) (2002) 49 p. (<http://www.risoe.dk/rispubl/SYS/ris-r-1344.htm> )