

УДК 502.3:504.064

## ИННОВАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

**С.А. Зайдес**, д-р техн. наук;

**А.В. Протасов**, канд. техн. наук, Иркутский национальный исследовательский  
технический университет (ИРНИТУ), г. Иркутск

Рассмотрена интеграция динамического моделирования с использованием модифицированных сети Петри и индексного метода оценки риска сложных технических систем в программный комплекс мониторинга технологических параметров оборудования нефтехимического комплекса в режиме on-line. Это позволит оперативно принимать управленческие решения по предотвращению отказов сложных технических систем.

**Ключевые слова:** управление качеством продукции; техногенный риск; анализ и оценка риска; жизненный цикл продукции; опасный производственный объект; сети Петри.

## INNOVATIVE RISK MANAGEMENT IN THE LIFE CYCLE OF THE PETROCHEMICAL COMPLEX EQUIPMENT

**Zaydes S.A.**, Dr. of technical sciences;

**Protasov A.V.**, Ph. D. of technical sciences, Irkutsk State Technical University (IRNITU), city of Irkutsk

We consider the integration of dynamic simulation using modified Petri net and index risk assessment method of complex technical systems in the software complex monitoring of process parameters petrochemical complex equipment in on-line mode. This will allow us to make management decisions to prevent the failures of complex technical systems.

**Keywords:** product quality control; man-made risk analysis and risk assessment; product life cycles; hazardous production facilities, Petri nets.

В настоящее время в Российской химической промышленности особенно актуально встает вопрос повышения конкурентоспособности предприятий и продукции. Это определяет создание и внедрение сложных технических систем (СТС), наличие высококвалифицированного персонала, а также создание инфраструктуры.

В последнее время в химической отрасли появилось большое количество мини-предприятий, оснащенных высокотехнологическим оборудованием, а также опасными производственными объектами (ОПО): печи, теплообменники, компрессорные установки, газовое хозяйство, подъемники

и т.д. Их развитие показывает, что для эффективного использования ресурсов в производственном процессе необходимо его совершенствование, грамотное управление, внедрение инновационных знаний и технологий для повышения качества и безопасности.

В связи с принятием Федеральных законов № 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" и № 184-ФЗ "О техническом регулировании", особую актуальность приобрели разработка и внедрение научно обоснованных методов риск-менеджмента, позволяющих всесторонне оценить возникновение

чрезвычайных ситуаций (ЧС): отказ, авария, инцидент, несчастный случай и т.д. на опасном производственном объекте, а также повысить безопасность СТС.

Постоянное развитие инновационных технологий требует оперативно, с минимальными затратами определять новые факторы, воздействующие на количественные и качественные показатели риска возникновения чрезвычайных ситуаций. Остается открытым вопрос комплексного, многофакторного рассмотрения возможностей использования интеллектуальных информационных технологий оперативного контроля и управления оборудованием, информационной поддержки принятия решений и, как следствие, снижение рисков и последствий ЧС. В то же время проблема концентрации на системе управления безопасностью приводит к тому, что управление риском отходит на второй план, что постепенно приводит к деградации оборудования и возникновению аварийных ситуаций.

Целью данного исследования является интеграция индексного метода оценки риска СТС и динамического моделирования с использованием модифицированных сети Петри в программный комплекс мониторинга параметров технологического оборудования в режиме on-line. Это позволит оперативно принимать управленческие решения по прогнозированию и предотвращению отказов СТС.

Полный жизненный цикл изделий обычно состоит из следующих циклов: мониторинг спроса и предложения на основе технологического прогнозирования, разработка технологий и создание научно-технического задела на основе системы управления рисками, интегрированное проектирование и производство, эксплуатация, ремонт, техническое обслуживание и утилизация.

Для управления жизненным циклом целесообразно использовать различные методы, шаблоны и инструменты управления. Координация работ в точках "стыка" циклов и анализ (управление) рисков в указанных точках требуют особого подхода.

Каждый цикл, в свою очередь, состоит из отдельных этапов. Этапы технического проектирования и содержание выполняемых на них работ строго определены ГОСТом. Функциональное существование технических систем проходит внутри организационных систем, причем отдельные его

циклы, и даже этапы, иногда обеспечиваются разными организациями [1].

На стадии эксплуатации производится доставка системы, ввод ее в эксплуатацию, эксплуатация, модернизация и снятие с эксплуатации. Анализ причин отказов (аварий) технических систем [2, 3] показал, что именно на этой стадии проявляется основная причина — техническая неисправность, включая коррозионно-механические повреждения материала, нарушения режимов эксплуатации и т.д. (рис. 1).

В настоящее время динамическое моделирование является хорошим инструментом для оценки и понимания переходных физических и химических процессов, а также для мониторинга систем управления безопасностью СТС.

Концепция системного подхода для анализа, оценки и управления техногенным риском, а также по выявлению первопричин отказа оборудования представлена на рис. 2. Под управлением риском понимается адекватное определение опасностей, угроз, а также негативных последствий и разработка комплексных мероприятий по снижению последствий с помощью системы диагностирования, предупреждения и мониторинга.

Объектами контроля систем мониторинга и управления инженерными системами, а в ряде случаев и управления являются технологические процессы, подсистемы жизнеобеспечения и безопасности, такие как теплоснабжение, инженерно-технический комплекс пожарной безопасности объекта, система оповещения, системы обнаружения повышенного уровня радиации, значительной концентрации токсичных и взрывоопасных концентраций веществ и др.

В целях повышения оперативности информационного обеспечения анализа технологических параметров, для мониторинга СТС с возможностью описания поведения ее элементов на высоком уровне детализации все большее применение находит метод имитационного моделирования, позволяющий исследовать динамику взаимодействия элементов системы во времени, контроля протекания процессов и принятия решения.

Одной из основных проблем при координации работы информационно-управляющих и диагностических систем является обеспечение динамической интеграции всех имеющихся разнородных параметров, в том числе и для оценки риска, в единую наглядную форму, отражающую все происхо-



Рис. 1. Обобщенная схема возникновения и развития отказа (аварии) технологического оборудования на промышленном предприятии



Рис. 2. Концепция системного подхода для анализа, оценки и управления техногенным риском

дящие изменения, что позволит выдавать соответствующие варианты решений.

Для создания математической модели СТС предлагается использовать модифицированную сеть Петри (СП) [4, 5], где определены основные понятия, связанные со структурой и поведением сети, которые используются для создания и управления моделями. Одним из основных свойств сети Петри является их способность отражать динамические характеристики моделей. Использование иерархических сетей Петри с приоритетами позволяет моделировать на различных уровнях сети состояние и функционирование как технологического процесса в целом, так и отдельных аппаратов, машин, механизмов и их деталей.

При количественной оценке риска возникают некоторые проблемы, связанные с нахождением частотной оценкой возникновения ЧС вследствие неопределенности исходных данных. При этих обстоятельствах целесообразно использование экспертного подхода, но и он имеет ряд недостатков. Главные из них заключаются в том, что для репрезентативности оценки необходимо наличие достаточного количества экспертов.

Существующие индексные и бальные методы анализа риска позволяют исключить эти недостатки путем использования безразмерных индексных оценок специальных шкал безопасностей, приводимых в нормативных документах, как для определенных объектов, так и используемых веществ. Кроме того, индексные методы значительно упрощают вычисления.

В основе этих методов лежит принцип оценки числовым (бальным) значением факторов опасности, без учета составляющих технологических операций. Существует множество разнообразных способов индексирования и выявления наиболее опасных факторов для ОПО в различных областях промышленности.

Примером специализированного индексного метода, используемого на предприятиях химической промышленности, является усовершенствованный индексный метод "Дау Кемикал" (*DOW – Dow's Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide*) [6, 7] для Российской промышленности.

Согласно этому методу, выделяются определенные производственные участки, для каждого из которых определяется фактор опасности материала  $M$ , характеризующий интенсивность энерговыделения при возгорании и оцениваемый в баллах в

диапазоне 1–40, и показатель опасности  $F$  в пределах 1–8.

Под фактором материала  $M$  понимается опасность используемых веществ; показатель опасности  $F$  включает в себя технические и технологические особенности оборудования.

Фактор материала определяют следующим способом – для отдельных производственных участков устанавливают потенциальные источники опасности (вещества), с соответствующими факторами опасности: количество вещества в оборудовании или технологической линии  $v$ , а также его индекс опасности  $I$  по специальной шкале. Показатели каждого источника опасности перемножаются, а результаты суммируются [6, 7].

$$M = \sum_{i=0}^n vI, \quad (1)$$

где  $n$  – число рассматриваемых веществ.

Показатель опасности  $F$  также разделяется на два показателя –  $f_1$  и  $f_2$  [6, 7],

$$F = f_1 f_2, \quad (2)$$

где показатель  $f_1$  характеризует условия увеличения или ослабления тяжести последствий (расположение аппарата на открытой площадке или в помещении, уровень опасности технологической операции, наличие системы оповещения и предупреждения ЧС);  $f_2$  характеризует специфические опасности, связанные с увеличением возникновения аварийной ситуации: высокое давление, температура, количество и тип нагревательных устройств, деградиационные процессы и др.

Оценку степени опасности определяют с помощью индекса Дау (*DOW*) [7]

$$DOW = FM. \quad (3)$$

Качественную оценку риска осуществляют с помощью матрицы риска. На основе полученных данных можно осуществлять мониторинг за уровнем безопасности производственного комплекса в целом и отдельных аппаратов.

В основном индексные методы разрабатывались зарубежными компаниями для своих производств. Использование их на российских предприятиях, где эксплуатируется оборудование как отечественного, так и импортного производства, без



Таблица 1

Шкала индекса DOW

Значение индекса DOW	Степень опасности
1–60	Малая (очень низкая опасность)
61–96	Средняя (низкая опасность)
97–127	Промежуточная (средняя опасность)
128–158	Серьезная (высокая опасность)
Более 159	Очень серьезная (очень высокая опасность)

должного адаптирования к законам РФ о промышленной безопасности может привести к резкому снижению уровня техногенной безопасности.

В основу получения индексов для оценки рисков для химического комплекса были приняты положения федерального закона ФЗ от 21.07.97 № 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" и федеральных норм и правил (ФНиП) "Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств".

Для фактора материала  $M$  предлагается использовать показатель категорий взрывоопасности технологических блоков (табл. 2) [8].

Относительный энергетический потенциал взрывоопасности  $Q_v$  технологического блока находится расчетным методом по формуле

$$Q_v = \frac{1}{16,354} \sqrt[3]{E}, \quad (4)$$

где  $Q_v$  — относительный энергетический потенциал взрывоопасности;  $E$  — общий энергетический потенциал взрывоопасности [8].

Таблица 2

Показатели категорий взрывоопасности технологических блоков

Категория взрывоопасности	$Q_v$	Общая масса горючих веществ $m$ , кг
I	$> 37$	$> 5000$
II	$27-37$	$2000-5000$
III	$< 27$	$< 2000$

При расчете показателя  $E$  используются такие важные параметры эксплуатации оборудования, как давление, температура, физические и химические свойства используемых веществ, а также скорость истечения опасных веществ из аппарата в случае возникновения ЧС.

В качестве показателя опасности  $f_1$  использована характеристика класса взрывоопасной зоны (помещения), в зависимости от степени опасности применяемых веществ и особенностей технологических процессов (табл. 3). Данные по классам взрывоопасных зон взяты согласно [9].

Для показателя  $f_2$  предлагается использовать характеристику химического аппарата согласно ГОСТ Р 52630-2012 "Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия" — группа (от 1 до 5), в зависимости от содержащихся в них веществ и их рабочих параметров.

Согласно выше изложенному были получены следующие интервалы индексов: фактора материала  $M = 1-3$ , показателя опасности  $F = 1-30$  и, соответственно, значение предлагаемого индекса опасности объектов нефтехимического комплекса (ИО<sub>опо</sub>) находится в диапазоне от 1 до 90.

Степень опасности определяется согласно табл. 4.

Любая методология, используемая для анализа и оценки риска, должна количественно отвечать на вопрос: какому риску подвергается население

Таблица 3

Показатель опасности  $f_1$ 

Показатель $f_1$	1	2	3	4	5	6
Класс взрывоопасной зоны	B-I	B-Ia	B-Iб	B-Iг	B-II	B-IIa

Таблица 4

Шкала индекса опасности ОПО

Значение индекса $ИО_{опо}$	Степень опасности	Показатель опасности
< 22	Высокая опасность	1
22–45	Средняя опасность	2
45–68	Малая опасность	3
68–90	Незначительная опасность	4

Таблица 5

Тяжесть последствий (уязвимость территории)

Плотность населения, тыс. чел./км <sup>2</sup>	Тяжесть последствий (класс уязвимости)
> 9,2	I (Очень высокая)
6,91–9,2	II (Высокая)
4,61–6,9	III (Средняя)
2,3–4,6	IV (низкая)
< 2,3	V (очень низкая)

региона в связи с промышленной деятельностью. В качестве такого критерия формально может быть использован показатель среднего риска для всего населения. При этом на основании поля потенциального риска можно и необходимо выделить из всего населения ту группу, которая потенциально может быть подвержена опасности.

Тяжесть последствий (уязвимость территории) предлагается определять через степень урбанизации территории (табл. 5) [10].

Уровень риска оценивается с помощью матрицы риска (табл. 6).

В матрице ранжированы следующие уровни риска:

1. Высокая величина ( $1 \leq R \leq 5$ ).
2. Средняя величина ( $5 \leq R \leq 10$ ).
3. Малая величина ( $10 \leq R \leq 15$ ).
4. Незначительная величина ( $15 \leq R \leq 20$ ).

Интеграция динамического моделирования с использованием модифицированных сети Петри, а также индексного метода позволило создать программное обеспечение, позволяющее проводить мониторинг систем, а также управлять риском возникновения аварийных (нештатных) ситуаций.

На основе разработанного программного обеспечения можно осуществлять мониторинг за уровнем безопасности производственного комплекса как в целом, так и отдельных аппаратов.

В качестве примера для расчета риска и уровня безопасности промышленного предприятия с использованием предлагаемых предложений был рассмотрен процесс абсорбции. Абсорбция представляет собой химико-технологический процесс, включающий массоперенос между газообразным

Таблица 6

Матрица риска

Показатель опасности	Тяжесть последствий (класс уязвимости)				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20

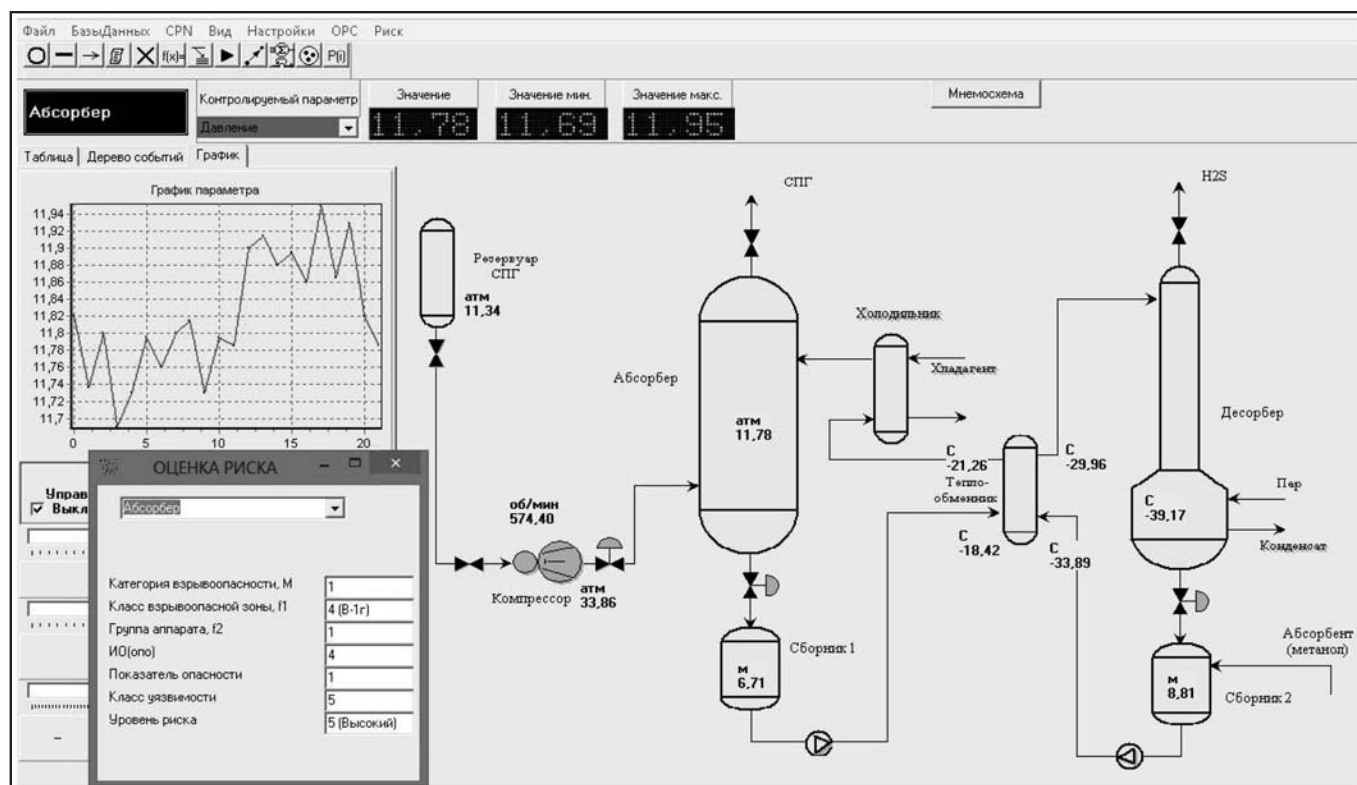


Рис. 3. Интерфейс информационной системы моделирования процесса абсорбции примесей СПГ

компонентом и жидким растворителем, осуществляемый в аппарате для контактирования газа с жидкостью.

В технологическую схему абсорбции примесей сжиженного природного газа (СПГ) входят следующие основные аппараты: абсорбер, резервуары, компрессор, насосы, десорбер, холодильник, теплообменник, а также емкости для сбора и хранения продукта. Принципиальная схема процесса абсорбции СПГ представлена на рис. 3, где изображен интерфейс информационной системы моделирования.

На данном примере показан расчет оценки риска возникновения нештатной ситуации в абсорбере. Результаты представлены в табл. 7.

Высокий уровень риска обуславливает необходимость проводить мероприятия по повышению безопасности данного объекта: постоянный мониторинг технологических параметров и при необходимости их изменение, смягчение условий эксплуатации, включение резервных аппаратов. Также возможны конструкторские и технологические решения по модернизации, повышению запасов

устойчивости, прочности, изменению регламентов технического обслуживания, увеличения глубины и частоты диагностирования. Уровень риска определяется для любого аппарата технологической цепи, результаты анализа риска появляются во всплывающем окне при наведении курсором на технологический объект.

Параллельно данная система позволяет проводить мониторинг технологических параметров оборудования в режиме on-line рабочая температура процесса, соотношение между количествами контактирующих абсорбента и газа (в данном случае для абсорбера – давление (рис. 3)). В случае их отклонения от нормы система выдает сообщение оператору о рекомендуемом принятии решения по устранению ошибки (уменьшению опасности), например открытие (закрытие) клапана.

Перед оператором постоянно представлены на табло измеряемые параметры, изменяемые во времени, в виде графика, в форме таблиц с перечнем оборудования и числовыми значениями.

В работе предложена концепция системного подхода для анализа, оценки и управления технологическим риском.

Таблица 7

Результаты оценки риска на основе системы индексов

№	Наименование показателя	Значение	Примечание
1	Категория взрывоопасности $M$	1	
2	Класс взрывоопасной зоны $f_1$	4	
3	Группа химического аппарата $f_2$	1	
4	Индекс $ИО_{\text{опо}} = Mf_1f_2$	4	
5	Показатель опасности	1	
6	Класс уязвимости	5	Плотность населения 1,2 тыс. чел./км <sup>2</sup>
7	Уровень риска	5	Высокая величина риска

Разработана концепция индексного метода оценки техногенного риска нефтехимического комплекса на территории России, учитывающего особенности технологических процессов и оборудования в соответствии с нормативными требованиями о промышленной безопасности в Российской Федерации.

Предложенный подход к анализу риска позволяет упростить расчет и дает возможность агрегирования информации и приведения ее к единой шкале.

Произведена модификация существующего аппарата сетей Петри с целью получения формализма, направленного на исследование технологических процессов различной структуры для предотвращения отказов. Модифицированные сети Петри получают путем расширения формализма цветных сетей Петри и введением меток с памятью, функциями прогнозирования, анализа и управления риска сложных технических систем.

Интеграция динамического моделирования с использованием модифицированных сети Петри, а также индексного метода позволила создать программное обеспечение, позволяющее производить мониторинг технологических систем, а также управлять риском возникновения аварийных (нештатных) ситуаций.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колчин А.Ф. Управление жизненным циклом продукции. М.: Анахарсис, 2002. 304 с.

2. Берман А.Ф. Деградация механических систем. Новосибирск: Наука, 1998. 320 с.

3. Мак-Ивили А.Дж. Анализ аварийных разрушений. М.: Техносфера, 2010. 416 с.

4. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 264 с.

5. Протасов А.В., Вильвер П.Ю. Интеллектуальная система обучения персонала основа обеспечения безопасности технологических процессов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 6. С. 32–36.

6. Протасов А.В., Вильвер П.Ю. Особенности использования метода индексирования при анализе техногенного риска в России // Вестник ИРГТУ. 2011. № 11. С. 262–266.

7. Якуш С.Е., Эсманский Р.К. Анализ пожарных рисков. Ч. I. Подходы и методы // Проблемы анализа риска. 2009. № 3. С. 8–27.

8. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств" // Нормативные документы в сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Серия 09. Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Вып. 37, 2-е изд. доп. М.: ЗАО НТЦ БП, 2013.

9. Смирнов Г.Г. Конструирование безопасных аппаратов для химических и нефтехимических производств. Л.: Машиностроение, 1988. 303 с.

10. Триворнов А.В. Оценка природного, техногенного и комплексного рисков территориально-промышленных образований (на примере Красноярского края): дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2008. 201 с.