

ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «АРБИТР»

ГЛАДКОВА И.А., НОЗИК А.А., СТРУКОВ А.В.,
ОАО "СПИК СЗМА", Санкт-Петербург. E-mail: info@szma.com

СТРУКОВ А.А.

Государственный университет морского и речного флота им.адмирала С.О.Макарова,
Санкт-Петербург, E-mail: a.a.strukov@gmail.ru

Аннотация. Современные методы оценивания риска в рамках формальной оценки безопасности (ФОБ) основаны на сочетании методологии анализа деревьев неисправностей и деревьев событий. Такое сочетание позволяет наиболее полно представить сценарии развития аварийных ситуаций. Показаны возможности программного комплекса «АРБИТР» решать задачи оценки последствий аварий на основе построения дерева событий, элементами которого могут быть модели деревьев неисправностей. Приведен пример оценки последствий аварий танкеров.

Ключевые слова: анализ риска, деревья неисправностей, деревья событий, сценарное логико-вероятностное моделирование.

Под риском понимают сочетание вероятности и последствий наступления неблагоприятных событий [1, 2]. Задачами анализа риска, таким образом, является оценка вероятности (частоты) наступления неблагоприятных событий (аварий) и последствий этих событий.

Наиболее часто количественной оценкой риска является ожидаемый ущерб – математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии за определенное время [1]. Арифметической оценкой ожидаемого ущерба может быть сумма произведений вероятности (частоты) реализации каждого сценария развития аварии на величину ущерба сценария, выраженную в условных единицах.

Современные методы оценивания риска базируются на сочетании методологии анализа деревьев неисправностей (ДН) и деревьев событий (ДС), что позволяет наиболее полно представить сценарии развития аварийных ситуаций с точки зрения анализа тех факторов, которые в наибольшей степени влияют на последствия аварий.

Сценарий аварии представляет собой последовательность событий, которая начинается с начального, являющегося некоторым возмущением нормального хода процесса. Это первоначальное возмущение называется базовым событием. Таким базовым событием может быть, например, отказ оборудования, ошибка человека или воздействие неблагоприятных внешних факторов. Это возмущение вызывает необходимость реакции со стороны оборудования и/или человека для возврата в нормальное состояние. Эти события в зависимости от результатов их реализации и внешних условий могут либо уменьшить, либо увеличить последствия аварийной ситуации. Набор последовательностей событий развития аварии составляет совокупность сценариев. Каждый сценарий заканчивается некоторым конечным состоянием, которое характеризуется вероятностью (частотой) наступления и величиной ущерба.

Таким образом, сценарий аварии может быть представлен как некоторый путь от инициирующего (исходного) события до конечного состояния. Некоторые события могут быть представлены в виде дерева неисправностей (ДН), например, ДН навигационного оборудования. Вершинное событие такого ДН может являться исходным событием ДС, которое представляет различные сочетания изменений внешних и внутренних факторов, влияющих на происходящий процесс.

Графически такой сценарий может быть представлен в виде двух треугольников, имеющих общий элемент в своих вершинах (рис.1).

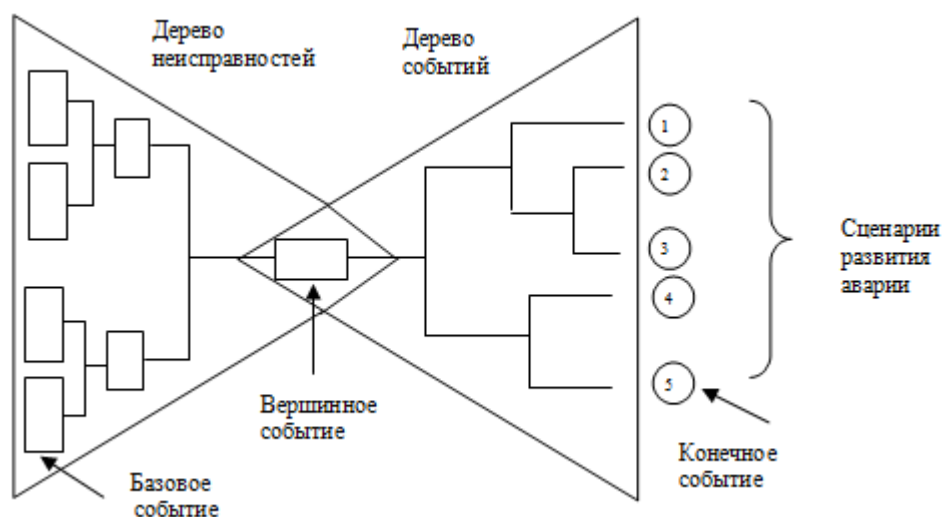


Рисунок 1 – Схема методологии оценивания риска

На современном этапе развития программных средств, используемых для анализа риска, взаимосвязь отдельных фрагментов ДН и ДС обычно реализуется на уровне взаимосвязи отдельных модулей (страниц) программ, в которых, например, результаты расчетов в модуле «Дерево неисправностей» являются исходными вероятностями для модуля «Дерево событий». При этом задачи каждого модуля реализуются в виде отдельного интерфейса.

Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем «АРБИТР» (ПК «АРБИТР») [3] позволяет реализовать технологию ДН и ДС, производить оценку последствий по набору сценариев в рамках одного графического интерфейса [4, 5].

ПК «АРБИТР» является инструментальным средством поддержки проведения исследовательских работ по анализу свойств надежности, стойкости, живучести и безопасности (технического риска возникновения аварий) структурно-сложных высокоразмерных систем опасных производственных объектов и объектов использования атомной энергии [3]. Теоретической основой комплекса является общий логико-вероятностный метод, использующий для структурного описания исследуемого свойства системы новый логически универсальный аппарат – схему функциональной целостности (СФЦ).

В качестве примера реализации метода анализа риска с использованием ПК «АРБИТР» рассмотрим задачу оценки последствий аварий танкеров большой вместимости, разработанную специалистами Морской международной организации (ИМО) [2].

В качестве основных причин потери водонепроницаемости корпуса судна в этом документе рассматриваются такие инциденты, как столкновения судов, контакты с другими плавучими объектами, посадка на мель, пожары и взрывы.

В данной статье рассмотрен пример оценки последствий при посадке на мель судна. По статистике, собранной за 1980-2007гг., данный вид аварий составил около 21% от 193 аварий танкеров водоизмещением более 60 000 т и происходил с частотой $7.49E-03$ (1/год). Средние потери нефти при затоплении танкера составляют 152 191 т/год, без затопления – 10 726 т/год.

Рассмотрим аварии, произошедшие с судами, находящимися в движении. Из 193 аварий танкеров 83% посадок на мель происходили в движении, а 17% – при дрейфе судов. По сравнению с авариями, происходящими при дрейфе, последствия посадки на мель судна на ходу являются более существенными.

Различают три большие группы последствий аварий судов: последствия для жизни и здоровья людей, влияние на окружающую среду и «потеря качества» (нанесение ущерба судну и грузу). В данной статье рассматривается только ущерб для окружающей среды.

Аварии типа «посадка на мель» могут происходить в терминальной зоне (14% аварий), в водах интенсивного судоходства (42% аварий), в узкостях (35% аварий) и в открытом море (9%).

Около 80% посадок на мель происходит с загруженными судами и только 20% в режиме балласта, но в этом случае ущерб окружающей среде является незначительным.

Будем рассматривать две причины потери водонепроницаемости судна – из-за повреждения корпуса и из-за повреждения двойного дна. Серьезность этих повреждений зависит от многих обстоятельств и будет характеризоваться по бинарной шкале (серьезные и несерьезные). Серьезные повреждения могут с определенной вероятностью приводить к затоплению судна.

На рис.2 показаны характеристики условий реализации событий, рассматриваемые при построении ДС, в задаче анализа аварии типа «посадка на мель» как случайного события касания с морским дном или берегом [2].

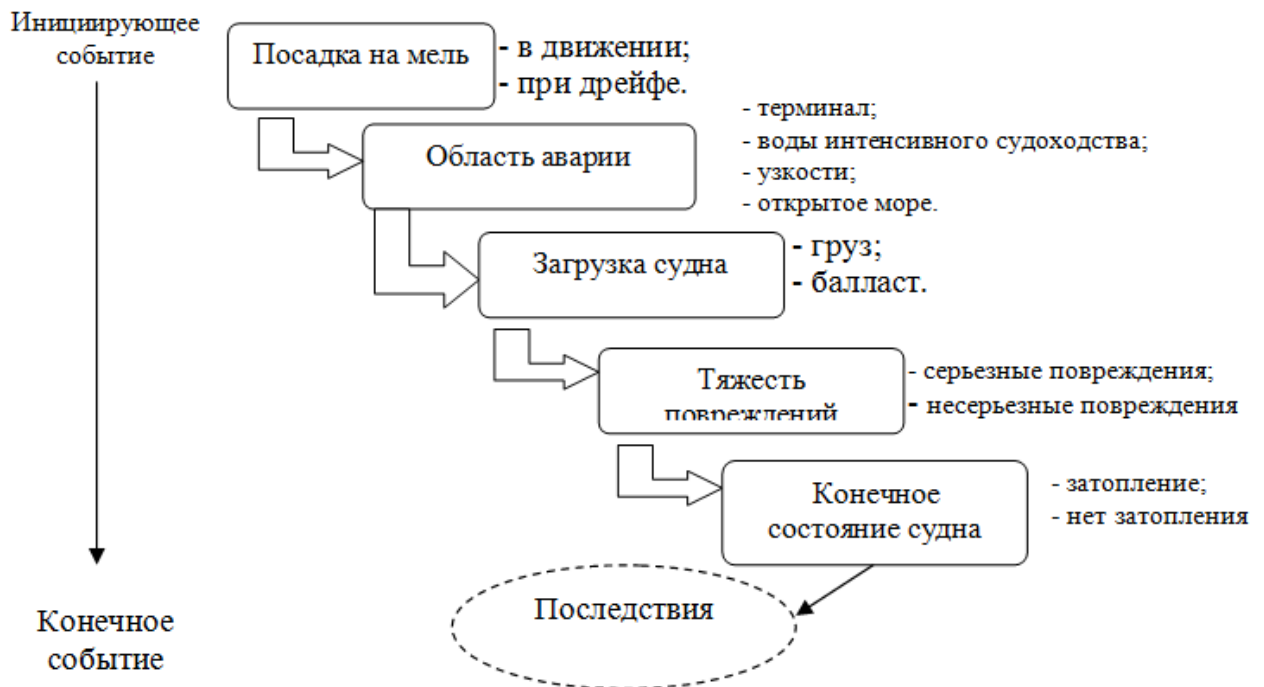


Рисунок 2 – Характеристики условий реализации событий

Экранный интерфейс ПК АРБИТР при решении задачи оценки последствия аварий (посадка на мель судна на ходу), в результате которых нанесен ущерб окружающей среде, представлен в виде СФЦ на рис.3.

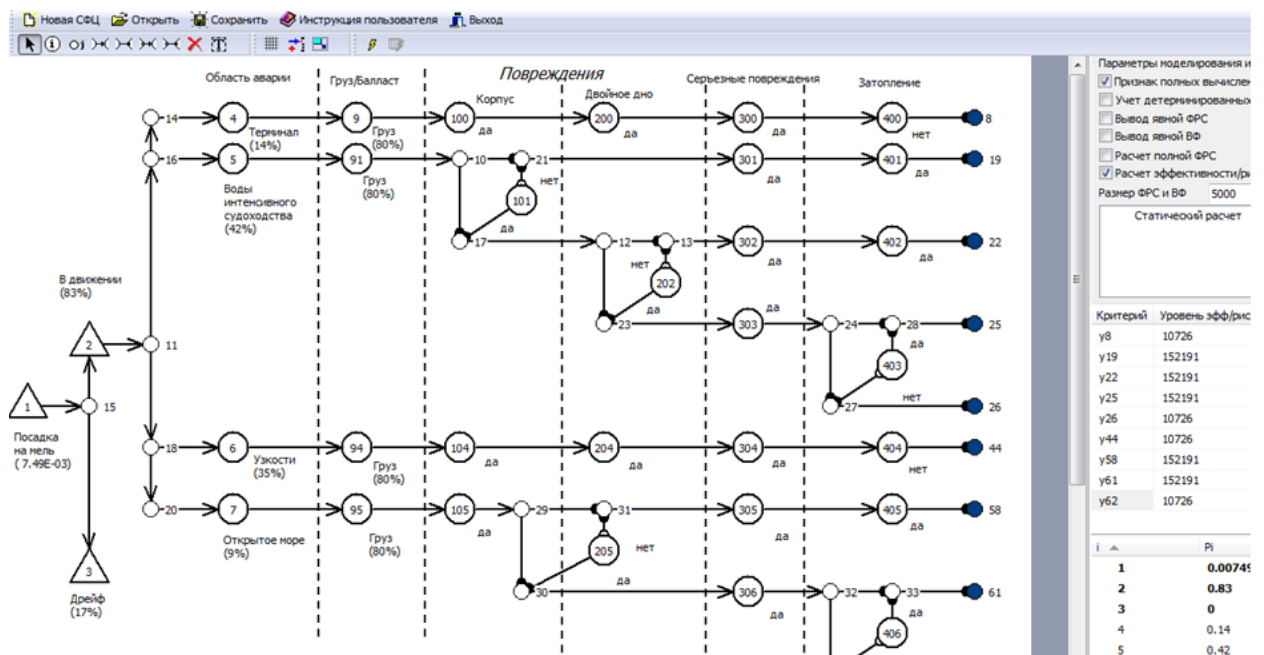


Рисунок 3 – Экранный интерфейс ПК АРБИТР: Сценарий «Посадка судна на мель»

На рис.3 слева треугольниками изображены элементы 1, 2 и 3 дерева неисправностей. Например, элемент №2 «В движении» отражает вероятность отказа навигационного оборудования, которое может иметь как структурное, так и функциональное резервирование. Возможно включение в структуру этого элемента событий, связанных с учетом человеческого фактора (ошибок экипажа).

Элемент №3 «Дрейф» может содержать такие составляющие события, как потеря управляемости при отказе винтовой или рулевой установки, которые в совокупности с отказом якорной установки и отсутствии буксиров могут привести к аварии с тяжелыми последствиями.

Примеры включения в качестве узлов дерева событий эквивалентированных вершин, которые позволяют осуществлять анализ отказов заданных структур, приведены в [4, 5].

Дерево событий на рис.3 (вершины № 4-406) показано без тех ветвей, которые не приводят к ущербу окружающей среды. Отступлением от общепринятой графической формы деревьев событий является использование функциональных вершин №№ 4 ÷ 7 для представления статических вероятностей, отображающих долю аварий соответствующих зон действия.

Можно утверждать, что общепринятые графические формы деревьев событий в виде горизонтальных графов, реализованные во многих зарубежных программных средствах анализа риска, обладают меньшей визуальной наглядностью, чем, например, табличная форма описания сценариев. В табл.1 приведено описание всех 9 сценариев, показанных на рис.3.

Таблица 1 – Сценарии аварийных ситуаций «Посадка на мель»

| № сценария | Зона действия | Груз/балласт | Повреждение корпуса | Повреждение Дв. дна | Серьезность повреждения | Затопление судна |
|------------|-----------------------------------|--------------|---------------------|---------------------|-------------------------|------------------|
| 8 | Терминал (0.14) | Груз (0.8) | Да (0.32) | Да (0.22) | Да (0.83) | Нет (1.0) |
| 19 | Зона активного Судоходства (0.42) | - « - | Нет (0.73) | - | Да (0.27) | Да (0.08) |
| 22 | | - « - | Да (0.27) | Нет (0.78) | Да (0.87) | Да (0.07) |
| 25 | | - « - | Да (0.27) | Да (0.22) | Да (0.87) | Да (0.07) |
| 26 | | - « - | Да (0.27) | Да (0.22) | Да (0.87) | Нет (0.93) |
| 44 | Узкость (0.35) | - « - | Да (0.15) | Да (0.22) | Да (1.0) | Нет (1.0) |
| 58 | Открытое море (0.09) | - « - | Да (0.5) | Нет (0.78) | Да (1.0) | Да (0.17) |
| 61 | | - « - | Да (0.5) | Да (0.22) | Да (1.0) | Да (0.17) |
| 62 | | - « - | Да (0.5) | Да (0.22) | Да (1.0) | Нет (0.83) |

В табл.1 под обозначениями событий в скобках указаны их вероятности. Для вычисления вероятности (частоты) варианта сценария необходимо перемножить вероятности, указанные в строке сценария, и умножить это произведение на частоту данного типа аварий ($7.49E-03$) и вероятность аварии судна на ходу (0.83).

Например, частота реализации сценария №8 равна

$$P_8 = \{0.14*0.8*0.32*0.22*0.83*1.0\} * 7.49E-03 * 0.83 = 4.068 E-05 \text{ (1/судно*год)}.$$

Для оценки последствий (ожидаемого ущерба) при реализации того или иного сценария необходимо умножить вероятность реализации каждого сценария аварии на соответствующую величину ущерба, наносимого окружающей среде. Величина ущерба оценивается объемом нефти, который попадает в море в аварийной ситуации. Если посадка на мель происходит без затопления судна, то за ожидаемый объем нефти берется средний объем топливного танка, который составляет 10 726 т. В случае полной потери груза (затопления судна) ущерб оценивается как средняя грузовая масса танкеров, которая составляет 152 191 т [2].

На рис.4 представлен фрагмент графического интерфейса ПК «АРБИТР», показывающий процедуру ввода исходных данных об ущербах для каждого сценария развития аварии. Для этого в правом верхнем углу интерфейса выбирается режим «Расчет эффективности/риска», а в таблице критериев функционирования в правом нижнем углу для каждого сценария в столбце «Критерий» (вершины у8, у19,...,у62) вводятся значения соответствующего ущерба (столбец «Уровень эфф/риск»).

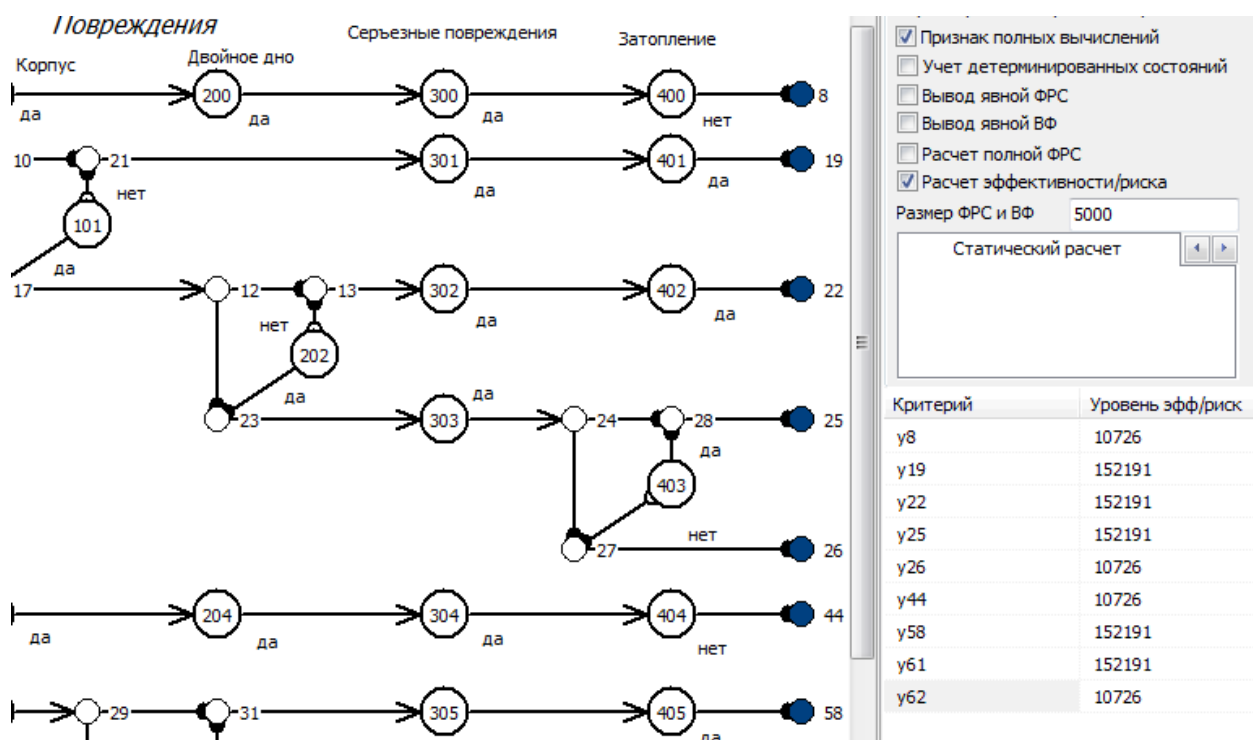


Рисунок 4 – Фрагмент экранного интерфейса для ввода исходных данных

Результаты расчетов последствий каждого сценария развития аварии приведены в табл.2.

Таблица 2 – Расчеты риска для аварий «посадка на мель»

| № сценария | Частота p_i реализации i -го сценария (1/судно*год) | Ущерб y_i (тонны) | Последствия [т/(судно·год)] |
|--------------------|---|---------------------|-----------------------------|
| 8 | 4.06845E-05 | 10726 | 4.36382E-01 |
| 19 | 3.29364E-05 | 152191 | 5.01262E+00 |
| 22 | 2.67901E-05 | 152191 | 4.07722E+00 |
| 25 | 7.55619E-06 | 152191 | 1.14998E+00 |
| 26 | 1.00389E-04 | 10726 | 1.07678E+00 |
| 44 | 5.74423E-05 | 10726 | 6.16126E-01 |
| 58 | 2.96760E-05 | 152191 | 4.51643E+00 |
| 61 | 8.37016E-06 | 152191 | 1.27386E+00 |
| 62 | 4.08661E-05 | 10726 | 4.38330E-01 |
| $\Sigma p_i * y_i$ | | | 1.85977E+01 |

Характеристика последствий аварий типа «посадка судна на мель» в движении 18.5977 т/(судно·год) показывает величину экологического ущерба в виде ожидаемого количества разлива нефти на одно судно в год.

Сценарное логико-вероятностное моделирование последствий аварий танкеров позволило, в частности, обосновать такие меры, как снижение объемов отдельных танков, более широкое использование оборудования GPC/ECDIS, снижающее вероятность навигационной ошибки,

увеличение мощности рулевой и винтовой установки, позволяющее улучшить маневренность судов [2].

В заключение необходимо отметить, что возможности графического интерфейса ПК АРБИТР позволяют формировать граф в виде объединения деревьев неисправностей и деревьев событий (ДНС). Применение в СФЦ эквивалентированных вершин предоставляет возможность детализации причин и факторов, приводящих к отказам оборудования и ошибкам личного состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Выпуск 10. М.: ГУП «НТЦ ПБ» Госгортехнадзора России, 2001. – 60с.
- 2 International Maritime Organisation (IMO), (2008): MEPC 58/INF.2 – Formal Safety Assessment, Crude Oil Tankers.
- 3 АРБИТР. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0. Автор: Можяев А.С. Правообладатель: ОАО "СПИК СЗМА". Свидетельство № 2003611101 от 12 мая 2003 г. об официальной регистрации программ. Роспатент РФ, Москва, 2003. Аттестационный паспорт ПС №222 от 21 февраля 2006 г. Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) РФ.
- 4 Гладкова И.А., Струков А.А., Струков А.В. «Сценарное логико-вероятностное моделирование опасной ситуации с использованием ПК АРБИТР». Сб. докладов II международной международной научно-практической конференции ИКМ МТМТС 2013, СПб, ОАО «ЦТСС», 2013. С.50–54.
- 5 И. В. Кудинович, Н.В. Шкляр, А.А. Нозик, А.В. Струков «Применение ПК АРБИТР для решения задач автоматизированного анализа надежности систем судовых атомных энергетических установок». Сб. докладов II международной международной научно-практической конференции ИКМ МТМТС 2013, СПб, ОАО «ЦТСС», 2013. С.55–59.