

УДК 330.4:519.2

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РИСКОВ ПРИ СОЗДАНИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

**А. И. ОРЛОВ,**

**доктор экономических наук, доктор технических наук,  
кандидат физико-математических наук, профессор,  
заведующий лабораторией  
экономико-математических методов  
в контроллинге Научно-образовательного центра  
«Контроллинг и управленческие инновации»  
E-mail: prof-orlov@mail.ru**

**А. Д. ЦИСАРСКИЙ,**

**кандидат технических наук,  
доцент кафедры экономики  
и организации производства  
E-mail: 93105948@tsniimash.ru  
Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана**

---

*В статье представлена впервые разработанная в общем виде аддитивно-мультипликативная модель оценки рисков. В двухуровневой схеме на нижнем уровне оценки рисков объединяются аддитивно, на верхнем – мультипликативно. Аддитивно-мультипликативная модель применена для оценки рисков проектов создания ракетно-космической техники. Выделено 44 частных риска на нижнем уровне и 8 – на верхнем соответственно этапам выполнения проекта. Рассмотрены условные примеры.*

**Ключевые слова:** риск, оценка, моделирование, проекты, ракетно-космическая техника, вероятность, экспертные процедуры.

---

**Введение.** Общая теория риска, которая разрабатывается в настоящее время [7], может найти применение во всех секторах экономики. Однако бесспорно, что при создании ракетно-космической техники нужен другой подход к анализу, оценке и

управлению рисками, чем, например, при организации работы банка. При моделировании жизненного цикла программы создания наукоемкой продукции необходимо учитывать риски, специфические для ракетно-космического сектора [2, 9]. Поэтому большое значение имеет развитие технологий адаптивного управления проектами создания, эксплуатации и утилизации ракетно-космической техники [1]. Так, для повышения эффективности реализации проектов по созданию перспективных образцов ракетно-космической техники целесообразно применять концепцию управления требованиями (Requirements Engineering) [12].

В настоящей статье впервые публикуется в общем виде аддитивно-мультипликативная модель оценки рисков (в предыдущих публикациях были рассмотрены частные случаи). Она применяется для оценки рисков при разработке ракетно-космической техники (РКТ).

**1. Аддитивно-мультипликативная модель оценки рисков (общий случай).** Аддитивно-мультипликативная модель оценки рисков основана на двухуровневой иерархической схеме декомпозиции риска (рис. 1). При этом на нижнем уровне агрегированные оценки групповых рисков строятся аддитивно (поскольку вероятности конкретных видов нежелательных событий – частные риски нижнего уровня – малы), а на верхнем уровне итоговая оценка риска рассчитывается по групповым рискам по мультипликативной схеме.

В общем случае аддитивно-мультипликативная модель оценки риска исходит из следующих **предпосылок**.

**Во-первых**, цель разработки модели – оценка риска наступления нежелательного события. Для расчета этого риска применяем вероятностную модель, согласно которой наступление нежелательного события является случайным событием – подмножеством множества всех возможных элементарных событий (см. рисунок).

Риск (нежелательное событие) будем обозначать  $R$ , его числовую вероятностную оценку  $Q$ . Пусть  $Q$  – вероятность наступления нежелательного события  $R$ , тогда  $P = 1 - Q$  есть вероятность того, что нежелательного события удастся избежать. Для простоты описания пусть  $Q$  – вероятность неудачи, тогда  $P = 1 - Q$  есть вероятность успеха, например,

вероятность успешного выполнения инновационного проекта (или его определенного этапа). В дальнейшем изложении используется двойственность  $Q$  и  $P$  (с прикладной точки зрения важна оценка риска  $Q$ , в то время как модель описывается с помощью вероятностей  $P$ ).

**Во-вторых**, примем, что для успеха (осуществления случайного события  $B$ ) необходимо одновременное выполнение  $m$  независимых условий (должны одновременно осуществиться случайные события  $B_1, B_2, \dots, B_m$ ). Предполагаем, что **случайные события  $B_1, B_2, \dots, B_m$  независимы в совокупности** (в терминах теории вероятностей [3]). Тогда вероятность успеха – вероятность  $P$  осуществления случайного события  $B$  – равна произведению вероятностей  $P_1, P_2, \dots, P_m$  осуществления случайных событий  $B_1, B_2, \dots, B_m$ , а именно:

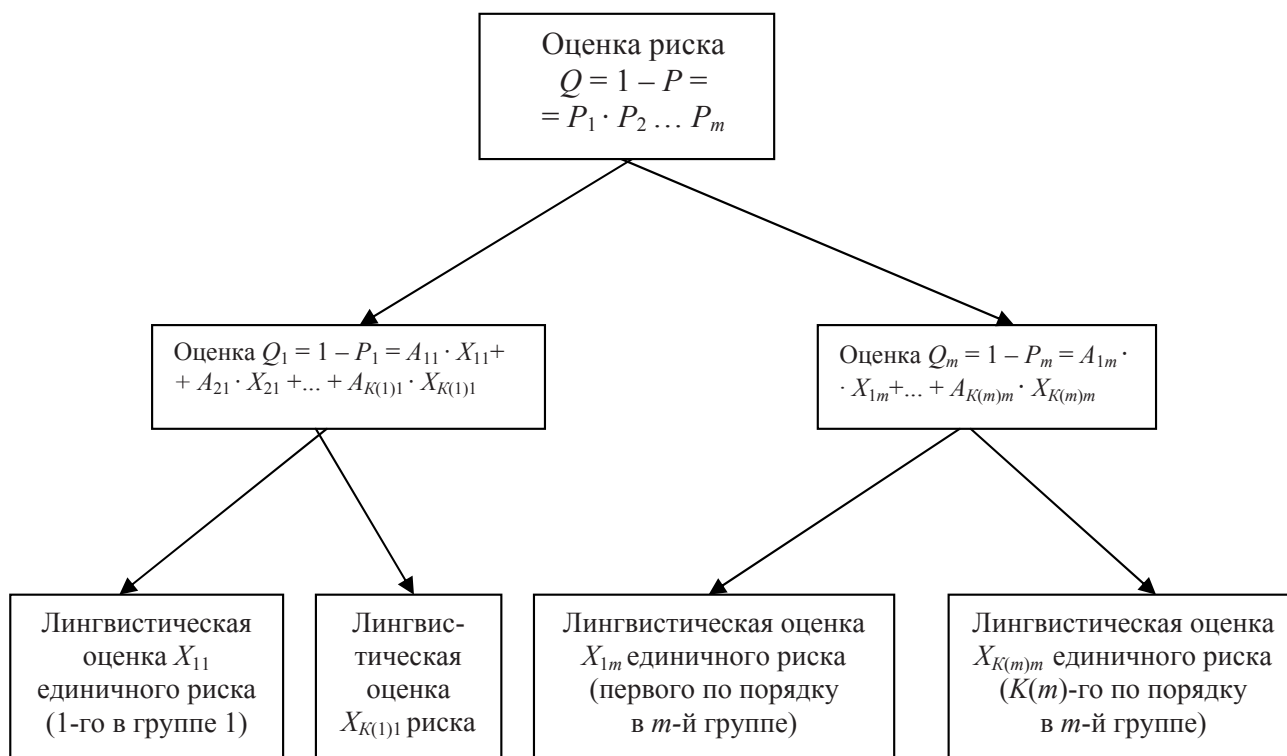
$$P = P_1 \cdot P_2 \dots P_m$$

Следовательно, оценка  $Q$  риска  $R$  (вероятность наступления нежелательного события) равна:

$$Q = 1 - P = 1 - P_1 \cdot P_2 \dots P_m$$

Оценка суммарного риска  $Q$  всегда больше оценки частного риска  $Q_i = 1 - P_i$ , поскольку итоговая вероятность  $P$  всегда меньше частной вероятности успеха  $P_i$ .

**В-третьих**, принимаем, что для осуществления  $i$ -го условия должны одновременно осуществиться



Декомпозиция рисков с помощью «дерева событий»

случайные события  $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{ik(i)}$ , имеющие вероятности  $P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ik(i)}$  соответственно. Здесь  $k(i)$  – число событий второго уровня декомпозиции (см. иерархическую схему на рис. 1), соответствующих  $i$ -му событию на первом уровне декомпозиции. Оценки частных рисков второго порядка  $R_i$  равны  $Q_{ij} = 1 - P_{ij}, j = 1, 2, \dots, k(i)$ . При моделировании предполагаем, что оценки частных рисков  $Q_{ij}$  малы, а частные вероятности успеха  $P_{ij}$  достаточно близки к 1.

Как выразить вероятность события  $B_i$  первого уровня через вероятности событий  $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{ik(i)}$  второго уровня? Рассмотрим два варианта:

а) события  $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{ik(i)}$  второго уровня независимы в совокупности (и дополнительные к ним события, соответствующие реализациям частных рисков, также независимы);

б) нежелательные события (соответствующие частным рискам) несовместимы.

В первом случае (а) независимости:

$$P_i = P_{i1} \cdot P_{i2} \dots P_{ik(i)} = (1 - Q_{i1}) (1 - Q_{i2}) \dots (1 - Q_{ik(i)}). \quad (1)$$

В случае (б) несовместимости (принимая, что риски реализуются редко, поэтому возможностями одновременного осуществления двух или нескольких нежелательных событий можно пренебречь):

$$P_i = 1 - Q_i = 1 - Q_{i1} - Q_{i2} - \dots - Q_{ik(i)}. \quad (2)$$

Формула (2) означает, что оценка  $Q_i$  частного риска  $R_i$  есть сумма оценок  $Q_{ij}$  частных рисков второго порядка  $R_{ij}$ :

$$Q_i = Q_{i1} + Q_{i2} + \dots + Q_{ik(i)}.$$

Поскольку оценки  $Q_{ij}$  частных рисков второго порядка  $R_{ij}$  малы, то, раскрывая скобки в правой части формулы (1), получаем, что с точностью до бесконечно малых второго порядка

$$(1 - Q_{i1}) (1 - Q_{i2}) \dots (1 - Q_{ik(i)}) = 1 - Q_{i1} - Q_{i2} - \dots - Q_{ik(i)}.$$

Таким образом, два принципиально разных подхода (а) и (б) дают одно и то же численное значение (с точностью до бесконечно малых более высокого порядка), что повышает обоснованность использования формул (1) и (2).

**В-четвертых**, каждый из частных рисков (факторов риска) второго порядка  $R_{ij}$  имеет два показателя – *выраженность* (показывает частоту встречаемости) и *весомость* (насколько влияет на риск более высокого уровня). Эти показатели можно оценивать на основе различных моделей.

Рассмотрим оценку выраженности. Если есть возможность, ее целесообразно проводить по

статистическим данным (как частоту реализации нежелательного события).

Можно использовать экспертные оценки. При этом естественно давать оценки рисков с помощью лингвистических переменных. Например, члены экспертной комиссии оценивают риск  $R_{ij}$  с помощью градаций лингвистической переменной  $X_{ij}$ , выбирая ее значения из списка:

0 – практически невозможное событие (вероятность – не более 0,01),

1 – крайне маловероятное событие (вероятность – от 0,01 до 0,05),

2 – маловероятное событие (вероятность от – 0,05 до 0,10),

3 – событие с вероятностью, которой нельзя пренебречь (от 0,10 до 0,20),

4 – достаточно вероятное событие (вероятность – от 0,20 до 0,30),

5 – событие с заметной вероятностью (более 0,30).

Этот список может меняться в соответствии с конкретной задачей оценки и управления риском. В частности, могут быть изменены:

– количество градаций;

– способ **оцифровки** градаций (например, вместо ряда 0 – 1 – 2 – 3 – 4 – 5 может использоваться ряд 0 – 0,2 – 0,4 – 0,6 – 0,8 – 1);

– граничные значения для вероятностей (например, если нежелательные события являются редкими, но соответствующий им ущерб велик, то вероятность практически невозможного события должна быть не более  $10^{-5}$  вместо «не более 0,01», как выше, и др.)

Естественно принять, что значения  $X_{ij}$ , используемые для оцифровки градаций, неотрицательны.

Лингвистические переменные естественно моделировать с помощью **теории нечеткости** (см., например, [4]). Тогда  $X_{ij}$  – нечеткие числа. Можно использовать «треугольные» нечеткие числа, у которых функция принадлежности описывается тремя числовыми параметрами  $a, b, c$  ( $a < b < c$ ) и имеет треугольный вид – функция принадлежности равна 0 левее  $a$  и правее  $c$ , в точке  $b$  равна 1, на интервалах  $(a, b)$  и  $(b, c)$  линейна. Арифметические операции над такими числами описываются проще, чем для функций принадлежности общего вида.

Другое обобщение – моделирование лингвистических переменных с помощью **интервальных чисел** (см., например, [5]). Тогда  $X_{ij}$  – интервал

$(a, b)$  или  $[a, b]$ ,  $(a, b]$ ,  $[a, b)$  – описывается двумя числовыми параметрами  $a$  и  $b$ . В примере, описанном выше, «крайне маловероятное событие» описывается интервалом  $(0,01; 0,05]$ .

Сбор и анализ экспертных оценок должны быть описаны в соответствующей методике [4]. В частности, согласно теории измерений итоговую оценку целесообразно рассчитывать как медиану индивидуальных оценок (при четном числе членов экспертной комиссии – как правую медиану).

**В-пятых**, при оценке  $Q_{ij}$  риска  $R_{ij}$  можно учесть весомость (важность) этого вида риска:

$$Q_{ij} = A_{ij} \cdot X_{ij}, \quad (3)$$

где  $A_{ij}$  – показатель весомости (важности), например, оценка экономических потерь, вызванных данным видом риска;

$X_{ij}$  – показатель выраженности (распространенности).

**Эта формула обобщает известный способ оценки риска как произведения среднего ущерба (математического ожидания ущерба) на вероятность нежелательного события.**

В соответствии с формулами (2) и (3) имеем

$$P_i = 1 - Q_i = 1 - Q_{i1} - Q_{i2} - \dots - Q_{ik(i)} = 1 - A_{i1} \cdot X_{i1} - A_{i2} \cdot X_{i2} - \dots - A_{ik(i)} \cdot X_{ik(i)}, \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

где  $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik(i)}$  – оценки факторов риска второго порядка, используемые при вычислении оценки частного риска типа  $i$ , положительные числа  $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ik(i)}$  – коэффициенты весомости (важности) этих факторов.

Значения факторов  $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik(i)}$  оценивают эксперты для каждого конкретного инновационного проекта, в то время как значения коэффициентов весомости  $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ik(i)}$  задаются одними и теми же для всех проектов – по результатам специально организованного экспертного опроса.

**В-шестых**, вероятность  $P_i$  должна быть неотрицательна при всех возможных значениях  $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik(i)}$ . Если все оценки факторов риска (частных рисков) принимают свои максимальные значения, то и риск  $R_i$  должен принять свое максимальное значение, равное 1. Следовательно, коэффициенты весомости (важности) должны удовлетворять условию

$$A_{i1} \max \cdot X_{i1} + A_{i2} \max \cdot X_{i2} + \dots + A_{ik(i)} \max \cdot X_{ik(i)} = 1.$$

В рассмотренном выше варианте оцифровки максимальные значения  $X_{ij}$  равны 5. Следовательно, сумма  $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ik(i)}$  должна равняться  $\frac{1}{5} = 0,2$ .

**В-седьмых**, все составляющие аддитивно-мультипликативной модели (АМ-модели) описаны. Обсудим некоторые дополнительные вопросы.

Отметим, что АМ-модель позволяет рассчитывать не только риск реализации проекта в целом, но и вероятности частичной его реализации [10]. Например, если проект предусматривает выполнение четырех этапов: НИР, ОКР, экспертизы, создание (и испытание) опытного образца, то представляют интерес вероятности успешного выполнения, в частности: 1) НИР; 2) НИР и ОКР; 3) НИР, ОКР и экспертизы – первого этапа; первого и второго этапов; трех начальных этапов. В случае сетевого графика может быть полезен расчет вероятности успешного прохождения отдельных ветвей.

Также АМ-модель позволяет описывать риски реализации инновационно-инвестиционного проекта, состоящего из нескольких этапов. Простейший вариант – верхний уровень иерархической схемы (см. рис. 1) соответствует этапам ( $m$  – число этапов). Более сложный вариант АМ-модели соответствует одному этапу, риски выполнения этапов независимы между собой, таким образом добавляется еще один уровень иерархии, на котором агрегирование вероятностей происходит по мультипликативной схеме.

Если какой-либо из рисков первого или второго порядка оказывается недопустимо велик (больше заданного порога), то естественно признать риск проекта в целом недопустимо большим и прекратить дальнейшие оценки и расчеты. Порог задают эксперты.

Риск проекта может быть выражен в вербальной форме, численное значение может быть переведено в значение лингвистической переменной.

В случае необходимости АМ-модель позволяет ввести коррективы в выполнение проекта. Если тот или иной риск недопустимо велик, проект не может быть успешно реализован с высокой вероятностью, то можно выявить критические факторы риска и разработать управленческие решения, позволяющие добиться успешной реализации проекта. Например, повторить этап с теми же или иными параметрами. Определить, как надо изменить значения критических факторов риска, чтобы добиться реализации проекта с вероятностью, не меньшей заданной, а затем оценить объемы ресурсов, необходимые для изменения значений выявленных критических факторов риска.

Таким образом, АМ-модель может быть развита в различных направлениях.

Аддитивно-мультипликативная модель оценки рисков может применяться для решения различных прикладных задач. Так, в работе автора [5, с. 359–370] она была использована для моделирования рисков выполнения инновационных проектов в вузах (с участием внешнего партнера), в этой модели  $m = 4$ .

В работе О. В. Пугач [8] АМ-модель применена для оценки рисков выпуска нового инновационного изделия, причем снова  $m = 4$ .

**2. Аддитивно-мультипликативная модель оценки рисков при разработке ракетно-космической техники.** Для демонстрации предлагаемого подхода примем, что разработка РКТ состоит из следующих восьми этапов:

- 1) концепция;
- 2) разработка технического проекта (аванпроекта и эскизного проекта);
- 3) разработка рабочей (конструкторской и технологической) документации;
- 4) изготовление макета и опытных изделий (опытного образца);
- 5) наземная отработка (испытания);
- 6) корректировка документации;

7) летные испытания и доработка документации для производства;

8) запуск.

На каждом этапе имеются те или иные риски. Будем оценивать риски и рассчитывать вероятности  $P_1, P_2, \dots, P_8$  успешного выполнения перечисленных выше этапов, используя их сокращенные (условные) названия. Примем, что риски на разных этапах порождены независимыми случайными причинами, поскольку они возникают в непересекающихся интервалах времени. Тогда вероятность  $P$  успешного выполнения разработки равна произведению вероятностей успешного выполнения этапов (мультипликативная составляющая модели):

$$P = P_1 \cdot P_2 \dots P_8.$$

Следовательно, оценка  $Q$  суммарного риска  $R$  или вероятность невыполнения разработки в заданный срок равна

$$Q = 1 - P = 1 - P_1 \cdot P_2 \dots P_8.$$

Будем применять аддитивно-мультипликативную модель с  $m = 8$ . На каждом этапе выделим частные риски  $R_{ij}$  второго порядка, всего 44 вида рисков (табл. 1).

Оценки рисков по этапам и суммарного риска будем давать с помощью аддитивно-мультиплика-

Таблица 1

Риски по этапам и экспертное определение весовых коэффициентов

№ п/п	Виды частных рисков по различным этапам	Оценки экспертов
<b>1. Концепция</b>		
1	$R_{11}$ – риск неверного технического решения (глобального – для изделия в целом)	10
2	$R_{21}$ – риск персонала (риск срыва работ из-за организационных проблем внутри НИИ)	10
3	$R_{31}$ – внешний риск (срыв работ по причинам, лежащим вне НИИ)	80
<b>2. Разработка технического проекта</b>		
4	$R_{12}$ – риск неверных технических решений (локальных, т. е. для отдельных блоков)	5
5	$R_{22}$ – риск недостаточно высокого качества подготовки проекта	20
6	$R_{32}$ – риск недостатка ресурсов (временных, кадровых, материальных, финансовых)	10
7	$R_{42}$ – организационный риск (из-за организационных проблем внутри предприятия)	5
8	$R_{52}$ – внешний риск	60
<b>3. Разработка рабочей документации</b>		
9	$R_{13}$ – риск ошибок при реализации технических решений	5
10	$R_{23}$ – риск недостаточно высокого качества подготовки документации	10
11	$R_{33}$ – риск недостатка ресурсов (кадровых, компьютерных, временных и др.)	35
12	$R_{43}$ – риски, связанные с невыполнением обязательств смежниками и субподрядчиками	25
13	$R_{53}$ – организационный риск (риск срыва работ из-за плохой их организации)	10
14	$R_{63}$ – внешний риск (кроме причин, указанных при описании рисков $R_{43}$ )	15
<b>4. Изготовление опытного образца</b>		
15	$R_{14}$ – риск ошибок при изготовлении деталей и блоков	5
16	$R_{24}$ – риск ошибок при сборке	10
17	$R_{34}$ – риск недостатка ресурсов (станочного парка, кадровых, компьютерных, временных и др. ресурсов)	35

Окончание табл. 1

№ п/п	Виды частных рисков по различным этапам	Оценки экспертов
18	$R_{44}$ – риски, связанные с невыполнением обязательств смежниками и субподрядчиками	25
19	$R_{54}$ – организационный риск (риск срыва работ из-за плохой их организации)	5
20	$R_{64}$ – риск, вызванный действиями поставщиков сырья, комплектующих, материалов (низкое качество, нарушение сроков)	15
21	$R_{74}$ – внешний риск (по другим причинам)	5
<b>5. Наземная отработка (испытания)</b>		
22	$R_{15}$ – риск ошибок из-за нарушения работы испытательного оборудования	10
23	$R_{25}$ – риск ошибок испытателей	10
24	$R_{35}$ – риск недостатка ресурсов	60
25	$R_{45}$ – организационный риск (риск срыва работ из-за плохой их организации)	5
26	$R_{55}$ – внешний риск	15
<b>6. Корректировка документации</b>		
27	$R_{16}$ – риск ошибок при корректировке документации	5
28	$R_{26}$ – риск недостаточно высокого качества подготовки документации	15
29	$R_{36}$ – риск недостатка ресурсов (кадровых, компьютерных, временных и др.)	50
30	$R_{46}$ – организационный риск (риск срыва работ из-за плохой их организации)	10
31	$R_{56}$ – внешний риск	20
<b>7. Летные испытания и доработка документации</b>		
32	$R_{17}$ – риск ошибок из-за нарушения работы испытательного оборудования	5
33	$R_{27}$ – риск ошибок испытателей (человеческий фактор)	10
34	$R_{37}$ – риск недостатка ресурсов	25
35	$R_{47}$ – организационный риск (риск срыва работ из-за плохой их организации)	10
36	$R_{57}$ – «риск машины»	10
37	$R_{67}$ – «риск среды»	10
38	$R_{77}$ – внешний риск (по другим причинам)	30
<b>8. Запуск</b>		
39	$R_{18}$ – риск дефектности изделия	5
40	$R_{28}$ – риск дефектности оборудования (на стартовом столе и в ЦУПе)	10
41	$R_{38}$ – группа факторов риска «Человек»	30
42	$R_{48}$ – группа факторов риска «Машина»	10
43	$R_{58}$ – группа факторов риска «Среда»	15
44	$R_{68}$ – внешний риск (по другим причинам)	30

тивной модели, используя лингвистические оценки  $X_{ij}$  рисков  $R_{ij}$  с шестью градациями, которым приданы числовые значения 0, 1, 2, 3, 4, 5. Соответствие между значениями лингвистических переменных и интервалами вероятностей приведено в разделе 1.

Для оценки рисков по этапам в соответствии с формулой (4) необходимо использовать коэффициенты весомости (важности)  $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ik(i)}$  факторов риска второго порядка. Эти коэффициенты были получены по результатам специально организованного экспертного опроса. По каждому из восьми этапов экспертам предлагалось распределить 100 баллов по видам рисков (в соответствии с их влиянием на риск по этапу). Ответы экспертов оказались достаточно хорошо согласованными, в табл. 1 в столбце «Оценки

экспертов» приведены итоговые значения – медианы ответов экспертов. Развернутое описание методики экспертного оценивания, проведенного в соответствии с рекомендациями [4], требует отдельного обращения и не входит в задачи настоящей статьи.

В соответствии с разделом 2 сумма коэффициентов весомости (важности)  $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ik(i)}$  должна равняться 0,2. Поэтому эти коэффициенты были получены путем деления соответствующих итоговых экспертных оценок на 500. Например, оценка 5 переходит в 0,01, оценка 15 – в 0,03, и т. д. Численные значения коэффициентов весомости приведены в табл. 2 в столбце «Веса  $A_{ij}$ ».

Другой экспертный опрос дал возможность получить лингвистические оценки рисков  $X_{ij}$  для двух проектов (табл. 2).

Таблица 2

**Поэтапные и суммарные оценки рисков при разработке ракетно-космической техники,  
рассчитанные на основе аддитивно-мультипликативной модели**

№ п/п	Риски $R_{ij}$	Весы $A_{ij}$	Проект 1		Проект 2	
			Оценки рисков $X_{ij}$	Вклад $A_{ij} X_{ij}$	Оценки рисков $X_{ij}$	Вклад $A_{ij} X_{ij}$
<b>1. Концепция (<math>i = 1</math>)</b>						
1	$R_{11}$	0,02	3	0,06	2	0,04
2	$R_{21}$	0,02	1	0,02	1	0,02
3	$R_{31}$	0,16	1	0,16	0	0
Оценка $Q_1$ риска невыполнения в срок этапа 1				0,24		0,06
Вероятность успешного выполнения этапа $P_1$				0,76		0,94
<b>2. Разработка технического проекта (<math>i = 2</math>)</b>						
4	$R_{12}$	0,01	2	0,02	3	0,03
5	$R_{22}$	0,04	0	0	1	0,04
6	$R_{32}$	0,02	1	0,02	0	0
7	$R_{42}$	0,01	0	0	0	0
8	$R_{52}$	0,12	1	0,12	0	0
Оценка $Q_2$ риска невыполнения в срок этапа 2				0,16		0,07
Вероятность успешного выполнения этапа $P_2$				0,84		0,93
<b>3. Разработка рабочей документации (<math>i = 3</math>)</b>						
9	$R_{13}$	0,01	3	0,03	1	0,01
10	$R_{23}$	0,02	1	0,02	1	0,02
11	$R_{33}$	0,07	1	0,07	0	0
12	$R_{43}$	0,05	1	0,05	0	0
13	$R_{53}$	0,02	0	0	2	0,04
14	$R_{63}$	0,03	0	0	0	0
Оценка $Q_3$ риска невыполнения в срок этапа 3				0,17		0,07
Вероятность успешного выполнения этапа $P_3$				0,83		0,93
<b>4. Изготовление опытного образца (<math>i = 4</math>)</b>						
15	$R_{14}$	0,01	4	0,04	1	0,01
16	$R_{24}$	0,02	2	0,04	0	0
17	$R_{34}$	0,07	1	0,07	0	0
18	$R_{44}$	0,05	1	0,05		
19	$R_{54}$	0,01	0	0	2	0,01
20	$R_{64}$	0,03	2	0,06	1	0,03
21	$R_{74}$	0,01	0	0	1	0,01
Оценка $Q_4$ риска невыполнения в срок этапа 4				0,26		0,06
Вероятность успешного выполнения этапа $P_4$				0,74		0,94
<b>5. Наземная отработка (испытания) (<math>i = 5</math>)</b>						
22	$R_{15}$	0,02	1	0,02	1	0,02
23	$R_{25}$	0,02	2	0,04	1	0,02
24	$R_{35}$	0,12	2	0,24	0	0
25	$R_{45}$	0,01	0	0	1	0,01
26	$R_{55}$	0,03	1	0,03	0	0
Оценка $Q_5$ риска невыполнения в срок этапа 5				0,33		0,05
Вероятность успешного выполнения этапа $P_5$				0,67		0,95

Окончание табл. 2

№ п/п	Риски $R_{ij}$	Весы $A_{ij}$	Проект 1		Проект 2	
			Оценки рисков $X_{ij}$	Вклад $A_{ij} X_{ij}$	Оценки рисков $X_{ij}$	Вклад $A_{ij} X_{ij}$
<b>6. Корректировка документации (<math>i = 6</math>)</b>						
27	$R_{16}$	0,01	0	0	1	0,01
28	$R_{26}$	0,03	2	0,06	0	0
29	$R_{36}$	0,10	1	0,10	0	0
30	$R_{46}$	0,02	1	0,02	1	0,02
31	$R_{56}$	0,04	1	0,04	0	0
Оценка $Q_6$ риска невыполнения в срок этапа 6				0,22		0,03
Вероятность успешного выполнения этапа $P_6$				0,78		0,97
<b>7. Летные испытания и доработка документации (<math>i = 7</math>)</b>						
32	$R_{17}$	0,01	1	0,01	0	0
33	$R_{27}$	0,02	3	0,06	1	0,02
34	$R_{37}$	0,05	2	0,10	0	0
35	$R_{47}$	0,02	0	0	0	0
36	$R_{57}$	0,02	2	0,04	1	0,02
37	$R_{67}$	0,02	2	0,04	1	0,02
38	$R_{77}$	0,06	2	0,12	0	0
Оценка $Q_7$ риска невыполнения в срок этапа 7				0,37		0,06
Вероятность успешного выполнения этапа $P_7$				0,63		0,94
<b>8. Запуск (<math>i = 8</math>)</b>						
39	$R_{18}$	0,01	1	0,01	2	0,02
40	$R_{28}$	0,02	0	0	0	0
41	$R_{38}$	0,06	2	0,12	0	0
42	$R_{48}$	0,02	1	0,02	0	0
43	$R_{58}$	0,03	2	0,06	1	0,03
44	$R_{68}$	0,06	1	0,06	0	0
Оценка $Q_8$ риска невыполнения в срок этапа 8				0,27		0,05
Вероятность успешного выполнения этапа $P_8$				0,73		0,95
Вероятность $P = P_1 \cdot P_2 \dots P_8$ успешного выполнения проекта				0,094		0,629
Оценка $Q = 1 - P$ риска $R$ , вероятность невыполнения проекта в срок				0,906		0,371

Таким образом, согласно табл. 2 вероятность выполнения в срок проекта 1 равна 0,094 – это событие маловероятно (чуть менее одного шанса из 10). Для этого проекта вероятности успешного выполнения этапов не малы – меняются от 0,63 до 0,84 (оценки рисков составляют от 0,16 до 0,37). Накапливаясь от этапа к этапу, оценка риска возрастает до явно недопустимого значения 0,906.

Для проекта 2 вероятности успешного выполнения этапов близки к 1 – меняются от 0,93 до 0,97 (оценки рисков составляют от 0,03 до 0,07). Тем не менее, накапливаясь от этапа к этапу, оценка риска возрастает до заметного значения 0,371, соответственно, вероятность успешного выполнения

проекта 2 (в срок) заметно меньше 1 и составляет 0,629 (несколько менее 2 шансов из 3).

**3. Дальнейшее развитие аддитивно-мультипликативной модели.** Обсудим некоторые возможные направления развития АМ-моделей.

С помощью АМ-модели, построенной на начальных этапах выполнения проекта (например, на этапе 1 «Концепция»), можно выделить факторы риска, вносящие наибольший вклад в суммарный риск. Управленческие воздействия, направленные на снижение соответствующих рисков, могут оказаться наиболее полезными для снижения суммарного риска.

Анализ данных табл. 2 показывает, что для проекта 1 из рисков по этапам наибольшим является



риск (с оценкой 0,37), соответствующий этапу 7 «Летные испытания и доработка документации», а для проекта 2 – риск (с оценкой 0,07), соответствующий этапу 3 «Разработка рабочей документации». Именно на эти этапы целесообразно обратить наибольшее внимание при управлении проектами.

Согласно данным табл. 2, отдельные риски второго порядка вносят в риски по этапам заметно больший вклад, чем другие виды рисков на тех же этапах. Так, для проекта 2 в риск на этапе 3 «Разработка рабочей документации» наибольший вклад (0,04 из 0,07 – больше половины) вносит риск  $R_{53}$  – организационный риск (риск срыва работ из-за плохой их организации). Для проекта 1 в риск на этапе 7 «Летные испытания и доработка документации» наибольший вклад вносят риски  $R_{37}$  (риск недостатка ресурсов), а также  $R_{77}$  (внешний риск) – 0,10 и 0,12 соответственно из оценки риска на этапе 0,37. На других этапах также можно выделить риски второго порядка, которые вносят в риски по этапам основной вклад. Так, для проекта 1 в риск на этапе 5 «Наземная отработка (испытания)» (оценка риска на этапе 0,33) наибольший вклад вносит риск  $R_{35}$  – риск недостатка ресурсов с оценкой 0,24 (более 70% от риска на этапе). Таким образом, можно выделить риски, управленческие воздействия на которые могут в наибольшей степени снизить общий риск.

Предположим, что известна стоимость реализации тех или иных управленческих решений. На основе АМ-модели можно рассчитать эффективность набора управленческих решений (снижение риска в результате применения указанного набора). Согласно АМ-модели риск оценивается числом от 0 до 1. Более продвинутые исследования могут дать возможность финансовой оценки рисков (в частности, потерь от реализации рискованных ситуаций и затрат на ликвидацию последствий). Решая задачу оптимизации при заданном бюджете на снижение рисков, находим наилучший набор управленческих решений, а также решаем двойственную задачу – определяем величину финансовых вложений, необходимых для снижения риска на заданную величину и поддержания в дальнейшем приемлемого уровня риска. Такой подход аналогичен тому, который был применен при разработке автоматизированной системы прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий [11].

Для реализации описанного направления развития АМ-модели необходимо внести в модель информацию о последствиях невыполнения очередного этапа в ходе разработки РКТ.

Можно оценивать накопленный риск на основе накопленной вероятности выполнения первых  $m$  этапов:

$$P = P_1 \cdot P_2 \dots P_k$$

где  $k$  последовательно принимает значения 1, 2, 3, ...,  $m$ .

Если вероятность  $P$  достаточно близка к 1, нет необходимости дополнять АМ-модель. Такая необходимость возникает, если вероятность  $P$  становится ниже определенного порога (заданного экспертно).

Что же произойдет, если очередной этап не будет выполнен? Согласно предлагаемой здесь **простейшей модели** этап будет *повторен и выполнен полностью*. Тогда разработка РКТ идет по одной из следующих траекторий:

- 1) 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 2) 1 – 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 3) 1 – 2 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 4) 1 – 1 – 2 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 5) 1 – 2 – 3 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 6) 1 – 1 – 2 – 3 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 7) 1 – 2 – 2 – 3 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 8) 1 – 1 – 2 – 2 – 3 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 9) 1 – 2 – 3 – 4 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 10) 1 – 1 – 2 – 3 – 4 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 11) 1 – 2 – 2 – 3 – 4 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 12) 1 – 1 – 2 – 2 – 3 – 4 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 13) 1 – 2 – 3 – 3 – 4 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 14) 1 – 1 – 2 – 3 – 3 – 4 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 15) 1 – 2 – 2 – 3 – 3 – 4 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 16) 1 – 1 – 2 – 2 – 3 – 3 – 4 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8;
- 17)...

Продолжая ряд траекторий разработки РКТ, надо иметь в виду, что всего их  $2^8 = 256$  возможных траекторий. Вероятность каждой из этих траекторий может быть вычислена на основе данных табл. 2. Поскольку известны оценки финансовых, временных и иных ресурсов для выполнения отдельных этапов, можно рассчитать необходимые ресурсы для каждой из траекторий, а затем построить функции распределения необходимых ресурсов и их характеристики (математическое ожидание, медиану, дисперсию и квантили). Отметим, что согласно простейшей модели общий расход ресурсов увеличивается не более чем в 2 раза.

В связи с дальнейшим развитием АМ-модели отметим, что в разделе 1 предложены модели на основе теории нечеткости и интервальных чисел. Необходимо изучить устойчивость выводов по отноше-

нию к допустимым отклонениям исходных данных и предпосылок АМ-модели [6]. Одним из направлений развития является дальнейшая разработка процедур сбора и анализа экспертных оценок.

#### Список литературы

1. Грачёв И. Д., Фионов А. С. Развитие технологий адаптивного управления проектами создания, эксплуатации и утилизации ракетно-космической техники // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. № 42.
2. Макаров Ю. Н., Хрусталёв Е. Ю. Механизмы реструктуризации наукоемких производств (на примере ракетно-космической промышленности) // Экономика и математические методы. 2010. Т. 46. № 3.
3. Орлов А. И. Вероятность и прикладная статистика: основные факты: справочник. М.: КноРус, 2010.
4. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование. Ч. 2. Экспертные оценки. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
5. Орлов А. И. Теория принятия решений. М.: Экзамен, 2006.
6. Орлов А. И. Устойчивые математические методы и модели // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 3.
7. Орлов А. И., Пугач О. В. Подходы к общей теории риска // Управление большими системами. 2012. Вып. 40.
8. Пугач О. В. Математические методы оценки рисков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 7.
9. Хрусталёв Е. Ю., Хрусталёв О. Е. Моделирование жизненного цикла программы создания наукоемкой продукции // Экономический анализ: теория и практика. 2012. № 16.
10. Хрусталёв Е. Ю., Хрусталёв Ю. Е. Оценка состояния экономической безопасности высокотехнологичных производств // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2006. № 2.
11. Хрусталёв С. А., Орлов А. И., Шаров В. Д. Оценка эффективности управленческих решений в автоматизированной системе прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (2).
12. Цисарский А. Д. Повышение эффективности реализации проектов по созданию перспективных образцов ракетно-космической техники на основе концепции requirements engineering // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. № 31.