

В.А. Острейковский, С.И. Зверев, Е.Н. Шевченко

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСХОДНЫХ СОБЫТИЙ АВАРИЙ И КАТАСТРОФ И УЩЕРБА ОТ НИХ ДЛЯ САМОЛЕТОВ И ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Приведены аналитические зависимости количественных значений частоты аварий и катастроф двух видов социально значимых техногенных событий — самолетов и ядерных энергетических установок. Рассмотрены результаты определения вида и параметров распределения частот по итогам длительной эксплуатации этих двух критически важных сложных высокоопасных динамических систем. По полученным данным можно с высокой степенью достоверности использовать значения показателей техногенного риска летательных аппаратов и атомных реакторов на этапах их проектирования и эксплуатации.

Аппроксимация, модели, авария, катастрофа, техногенный риск.

Введение

В настоящее время в практике оценки техногенного риска все чаще стали применяться методы математического моделирования. Однако при выполнении вероятностного анализа систем (PRA — Probability Risk Assessment) необходимо учитывать относительную важность зависимостей через определение их вклада в величину риска как в будущих проектах сложных систем, так и при оценке риска при эксплуатации. Особенно это важно делать для таких социально значимых высокоопасных систем, какими являются самолеты и ядерные энергетические установки. Поэтому высокую актуальность приобрели исследования по определению относительной важности вклада количественных значений вероятностей исходных событий аварий и катастроф и ущерба от них в величину риска. Одним из важных критериев техногенной безопасности является функция средней частоты событий в год F (F/N — кривая) по значениям числа N ущерба от этих событий [2]. По кривым $f = f(F/N)$ можно определять границу верхней области недопустимо большого риска от области приемлемого риска, расположенной ниже и левее этой кривой. На кафедре информатики и вычислительной техники Сургутского государственного университета разработан комплекс математических моделей для анализа оценки и прогнозирования показателей техногенного риска в пространстве независимых и зависимых случайных величин вероятностей исходных событий аварий и катастроф и ущерба от них [4, 5]. Также получены аналитические зависимости для функции плотности распределения риска при различных законах распределения вероятностей исходных событий и ущерба широкого класса линейных и нелинейных видах функций риска во времени. Однако для практического применения полученных зависимостей риска не хватает конкретных статистических данных по виду и параметрам законов распределения вероятностей исходных событий и ущерба от них.

Поэтому целью данной статьи является анализ статистики по кривым $f = f(F/N)$ для таких критических объектов, как летательные аппараты и ядерные энергетические установки.

Характеристика статистических данных для моделирования чрезвычайных событий

Исходные статистические данные для поиска математических моделей описания одного из показателей техногенного риска — средней частоты событий в год $F(N)$ — для критически важных объектов: самолетов и атомных реакторов взяты из книги [1] и показаны на рис. 1 и в табл. 1. Здесь же приведены суммарные данные и для других видов чрезвычайных событий.

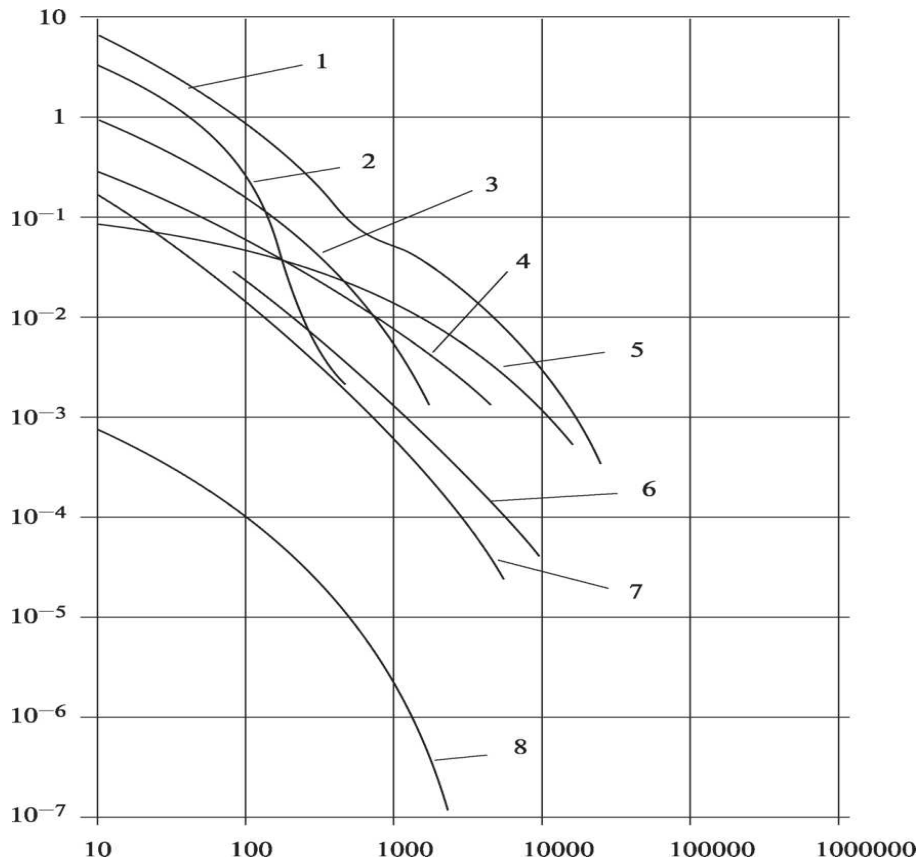


Рис. 1. Частота и количество связанных с техникой несчастных случаев:
 1 — суммарная кривая; 2 — общее число аварий самолетов; 3 — пожары; 4 — взрывы;
 5 — прорывы плотин; 6 — выбросы вредных химических веществ; 7 — аварии самолетов
 (без пассажиров); 8 — аварии на 100 атомных реакторах

Определение вида и параметров распределения частот $F(N)$

Расчет параметров кривых $f = f(F/N)$ выполнялся в среде Matlab R 2012a [3]. При этом были определены для каждого чрезвычайного события уравнения вида $f = f(F/N)$ и следующие коэффициенты:

1. Виды зависимостей

$$F(N) = A * e^{B * N}, \quad (1)$$

$$F(N) = A * e^{\frac{(N-B)^2}{C}}, \quad (2)$$

$$F(N) = A * e^{B*N} + C * e^{D*N}, \quad (3)$$

где A, B, C, D — коэффициенты.

Таблица 1

Виды чрезвычайных событий							
Аварии самолетов (без пассажиров)		Общее число аварий		Аварии на 100 атомных реакторах		Суммарная кривая	
N	$F*10^5$	N	$F*10^3$	N	$F*10^3$	F	$F*10^3$
94	153,1	10	5692	10	312	10	8429
204	137,2	21	4910	21	206	16	8038
377	116	37	3737	31	104	21	7647
550	94,8	48	2564	42	92,05	25	7256
723	73,6	57	1782	52	78,8	36	6477
896	49,75	74	901	62	66,875	44	5692
1347	28,55	88	725,6	73	54,95	59	4519
3077	18,225	95	530,1	83	41,7	66	3737
4808	15,575	138	334,6	94	31,1	78	2564
6539	12,925	213	100	135	17,85	85	1782
8270	10,275	250	88,2	239	11,225	93	1
9827	7,36	287	60	343	8,94	138	882
		363	33,46	446	7,88	250	803,8
		438	9,4	550	6,29	288	686,5
		513	7,2	654	5,23	363	608,3
		588	5,3	758	3,64	438	491
		663	4,128	862	1,52	513	373,7
				965	0,9735	588	266,4
				1347	0,8145	663	139,1
				2385	0,629	738	92,11
				3423	0,47	813	84,29
				4462	0,311	850	80
				5500	0,099	925	76,47
				6539	0,0788	1750	68,65
				7577	0,0523	2875	60
						4000	49,1
						5874	25,64
						7000	10
						8875	7,256
						9250	5,692
						17500	3,737
						25000	2,173
						36250	0,882
						43750	0,6865

2. Критерий оценки пригодности приближения

$$S = \sum_{k=1}^n w_k (y_k - \tilde{y}_k)^2, \quad (4)$$

где w_k — веса точек; y_k — экспериментальные данные; \tilde{y}_k — данные, полученные при построении модели.

3. Число степеней свободы

$$k = m - n, \quad (5)$$

где m — количество экспоненциальных точек; n — количество параметров модели.

4. Сумма квадратов регрессии

$$S_1 = \sum_{k=1}^n w_k (g_k - g_k^-)^2, \quad (6)$$

где g_k — экспериментальные данные; g_k^- — среднее значение g в полученной модели.

5. Сумма квадратов регрессии

$$S_2 = \sum_{k=1}^n w_k (g_k^{\sim} - g_k^-)^2, \quad (7)$$

где g_k^{\sim} — экспериментальные данные; g_k^- — среднее значение y в полученной модели.

6. Квадрат смешанной корреляции (коэффициент детерминации)

$$R^2 = \frac{S_2}{S_1}. \quad (8)$$

7. Скорректированный коэффициент детерминации

$$Adj.R^2 = 1 - \frac{s(n-1)}{s_1(n-m)}. \quad (9)$$

8. Среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{w_k (y_k - y_k^{\sim})^2}{n}}, \quad (10)$$

где w_k — веса точек; y_k — экспериментальные данные; y_k^{\sim} — данные, полученные при построении модели; n — число элементов в выборке.

В ходе вычислений были получены следующие результаты, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Вид зависимости и значения параметров функции связи частоты аварий и катастроф и ущерба от них

Наименование кривой	Вид зависимости $F = f(N)$	Значения коэффициентов и их доверительные интервалы				Коэффициент детерминации R^2	Среднеквадратическое отклонение σ
		A	B	C	D		
Аварии самолетов (без пассажиров)	$F(N) = F^*e^{Z^*N} + C^*e^{D^*N}$	0,0448 (0,3821; 0,1515)	-0,0687 (-0,09065; -0,04675)	0,09889 (- 0,03341; 0,1644)	-0,01029 (- 0,01741; 0,003169)	0,9912	0,0075
Общее число аварий самолетов	На отрезке $N[10;74]$ $F(N) = A^*e^{(B^*Z^*)/Q^2}$	5,958 (5,163; 6,752)	-1,914 (-16,11; 12,28)	54,24 (42,86; 65,62)	—	0,9983	0,0976
	На отрезке $N[75;663]$ $F(N) = A^*e^{Z^*N}$	1,538 (1,301; 1,774)	-0,01118 (-0,01258; -0,009776)	—	—	0,9952	0,0181
	$F(N) = A^*e^{Z^*N}$	0,0006852 (0,0005616; 0,0008089)	-0,00426 (-0,006376; -0,002143)	—	—	0,8172	0,00013298

Окончание табл. 2

Наименование кривой	Вид зависимости $F = f(N)$	Значения коэффициентов и их доверительные интервалы				Коэффициент детерминации R^2	Среднеквадратическое отклонение σ
		A	B	C	D		
Суммарная кривая (сумма всех кривых рис. 1)	На отрезке $N[10;40]$ $F(N) = A*N+B$	-0,07537 (0,08364; 0,06711)	9,199 (9,006; 9,393)	—	—	0,9965	0,0517
	На отрезке $N[40;90]$ $F(N) = A*e^{-((N-2)/Q)^2}$	5,933 (5,591; 6,275)	34,12 (28,34; 39,91)	47,25 (42,11; 52,39)	—	0,9998	0,0316
	На отрезке $N[90;700]$ $F(N) = A*N+B$	-0,001434 (-0,001548; 0,001321)	1,117 (1,065; 1,169)	—	—	0,9906	0,0323
	На отрезке $N[700;4400]$ $F(N) = A*e^{z^N}$	0,1037 (0,09449; 0,1129)	-0,0002405 (-0,0002864; -0,0001945)	—	—	0,9779	0,005535

На рис. 2–9 в качестве иллюстрации показаны значения функции $F(N)$ в соответствующих диапазонах F и N .

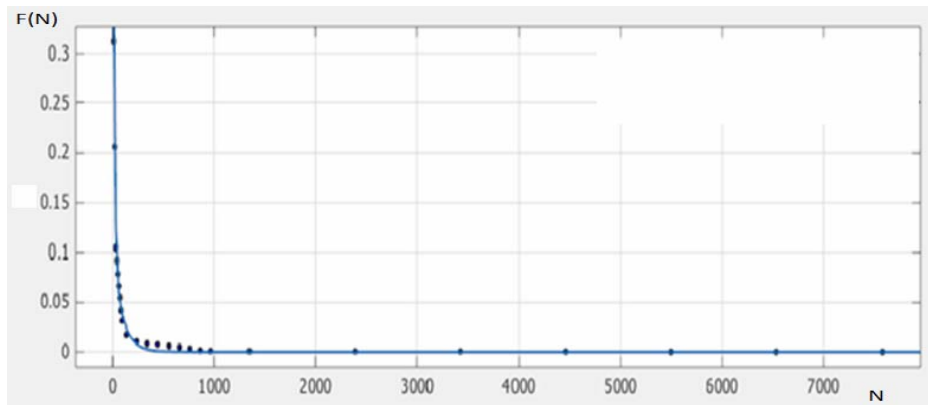


Рис. 2. Аварии самолетов (без пассажиров)

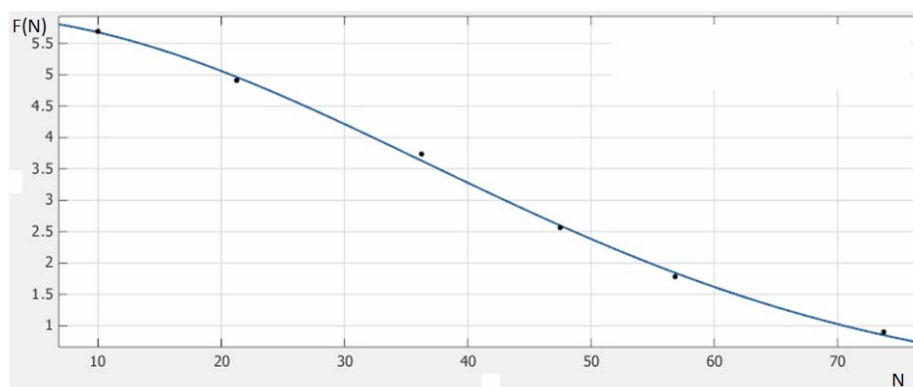


Рис. 3. Кривая «Общее число аварий самолётов» на отрезке $N[10;74]$

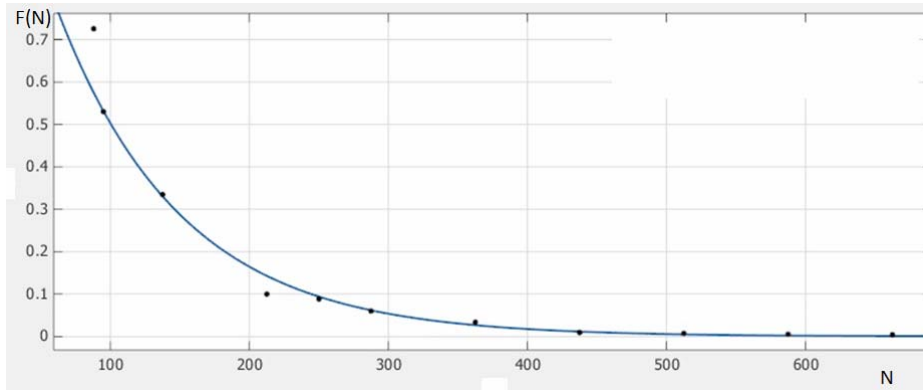


Рис. 4. Кривая «Общее число аварий самолётов» на отрезке $N[75;663]$

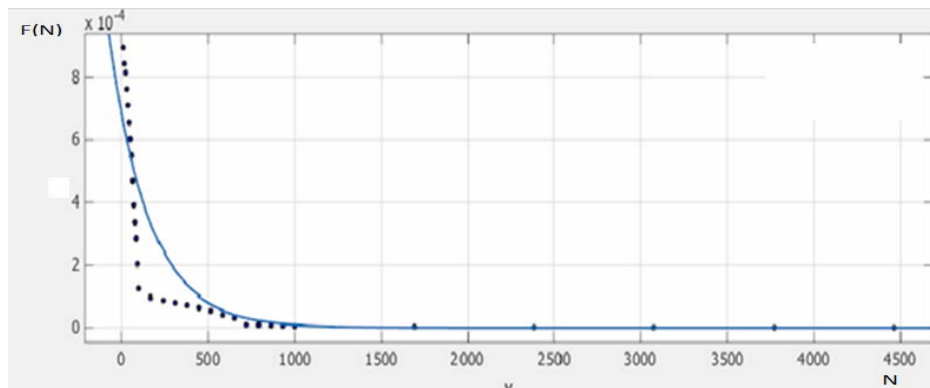


Рис. 5. Кривая аварий на 100 атомных реакторах

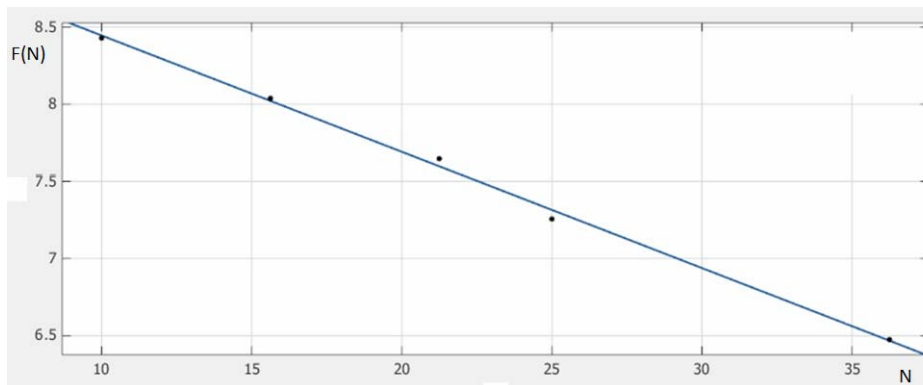


Рис. 6. Кривая «Суммарная кривая» на отрезке $N[10;40]$

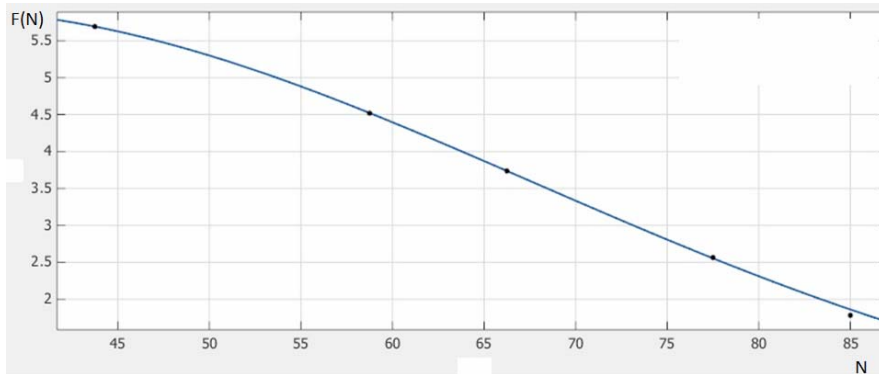


Рис. 7. Кривая «Суммарная кривая» на отрезке $N[40;90]$

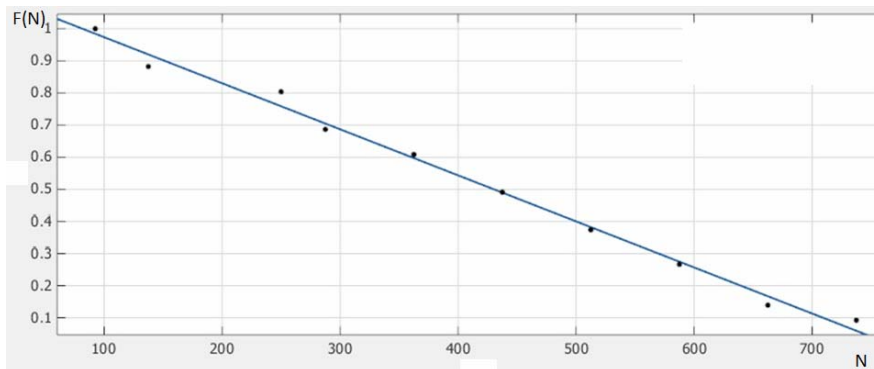


Рис. 8. Кривая «Суммарная кривая» на отрезке $N[90;700]$

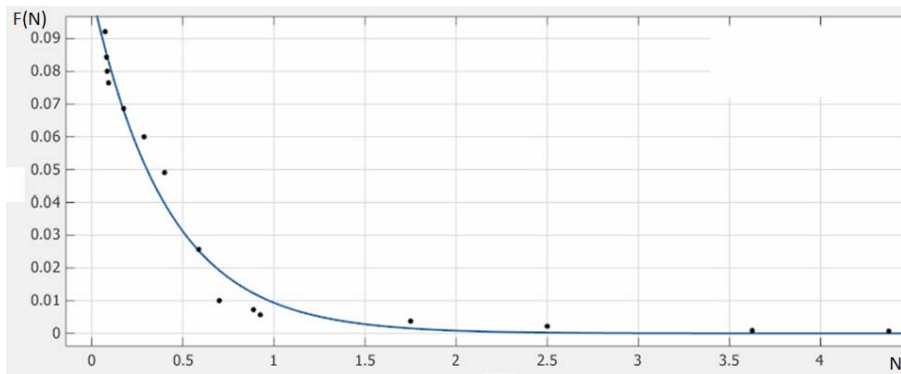


Рис. 9. Кривая «Суммарная кривая» на отрезке $N[700;44000]$

Заключение

По результатам полученных в статье аппроксимаций средних значений частот аварий и катастроф можно сделать следующие выводы:

1. Аналитические зависимости изменения функции частоты F аварий и катастроф от ущерба (числа N), имеющего размерность либо стоимости, либо

числа погибших людей, имеют закономерности: линейные и экспоненциальные (даже суммы экспонент), т.е. в общем случае — не линейные.

2. Аварии и катастрофы на атомных реакторах и самолетах описываются экспоненциальными закономерностями.

3. Суммарная кривая всех возможных аварий и катастроф, включая пожары, взрывы, прорывы плотин, выбросы вредных химических веществ, самолетов и атомных реакторов, аппроксимируется на одних участках ущерба линейными зависимостями, а на других — экспонентами.

4. Значения критерия пригодности приближения S , среднеквадратическая ошибка σ близки к 0, коэффициент детерминации R^2 близок к 1, что говорит о том, что регрессионные модели не противоречат экспериментальным данным;

5. Параметры коэффициентов регрессии лежат внутри интервалов при доверительной вероятности 0,95 и уровне значимости 0,05.

6. Полученные аналитические зависимости для частоты событий рассмотренных видов аварий и катастроф могут использоваться специалистами по безопасности как на стадии проектирования высокоответственных сложных критических систем, так и при их применении по назначению.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Акимов В.А.* Надежность технических систем и техногенный риск. М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. 368 с.

2. *Гражданкин А.И.* Риск аварии как оценка нежелательных потерь / А.И. Гражданкин, Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды международной научной школы МА БР-2002. СПб.: Изд-во «Бизнес – Пресса», 2002. С. 515–518.

3. *Методы аппроксимации* [Электрон. ресурс]: <http://pers.narod.ru/study/methods/03.html>.

4. *Острейковский В.А.* Теория техногенного риска: математические методы и модели: монография. Сургут; ИУ СурГУ, 2013. 320 с.

5. Шевченко Е.Н. Математические модели техногенного риска от обустройства нефтегазовых месторождений // Вестник кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2012. № 11. С. 76–80.

Ostrejkovsky V.A., Zverev S.I., Shevchenko E.N.

Analytical dependence of the distribution of initial events of accidents and disasters and damage them for aircraft and nuclear reactors operating results

The analytical dependence of quantitative values of the frequency of accidents and disasters of two types of socially significant technological developments - aircraft and nuclear power plants. The results of determining the type and parameters of the frequency distribution on the results of long-term operation of these two critical of highly complex dynamical systems. According to the obtained results, it is highly significant to use the values of technological risk aircraft and nuclear reactors at the stages of design and operation.

The approximation of the accident, models, catastrophe, technogenic risk.