ПРОГНОЗ АВИАЦИОННЫХ СОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ ИМЕЮЩИХСЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

д.т.н. В.Е. Овчаров (МАК)

Введение

В авиационных летных училищах существовал феномен: в какой-то момент времени в летных подразделениях училища летчики–инструкторы и курсанты начинали «заболевать», проситься в наряды и караулы, записываться на парашютные прыжки – одним словом, всячески старались не летать. Через короткое время поступало сообщение, что на одном из аэродромов училища кто-то произвел посадку с убранным шасси (например!), или в зоне курсант с инструктором покинули самолет, или еще что-нибудь в этом роде. Сразу в «младшем летном составе» – курсанты и инструкторы – вновь просыпался летный энтузиазм, снова все рвались в воздух ...

Этот феномен объясняется чрезвычайно просто. В училищах той поры был большой (по сравнению со строевыми частями) общий налет и наиболее наглядно проявлялся закон больших чисел, в соответствии с которым случайные события, имеющие конечную вероятность возникновения, при большом объеме выборки происходят с частотой, асимптотически (по мере увеличения объема выборки) приближающейся к значению вероятности. А, значит, и интервал между ними (налет часов, число полетов) соответствует этому значению вероятности. Кроме информационных служб, никто (а уж курсанты и инструкторы наверняка) не отслеживал статистики, но все чувствовали приближение этого момента интуитивно, что и порождало соответствующие настроения.

Нечто подобное происходит в авиации всегда и везде, но, к сожалению, по ряду причин (в том числе, из-за разобщенности и недостаточного информационного обеспечения и изучения статистики) остается лишь для горькой констатации фактов.

Каждое авиационное происшествие (АП) уникально и неповторимо. Всякий раз имеет место свое сочетание обстоятельств и факторов. Однако, группы факторов для какого-то периода, характеризуемого социально-экономическими условиями, уровнем технического развития авиации, принципами отбора, обучения и периодической подготовки летного состава или другими причинами, повторяются.

Как известно, теория вероятностей изучает случайные события, которые в каждом конкретном случае детерминированы, но в совокупности они в вероятностном смысле являются случайными.

Теория вероятностей, если верить легенде, родилась при попытках угадать сочетание очков при бросании костей с целью максимизации выигрыша (или, по крайней мере, минимизации проигрыша). Но ведь при каждом броске имел место определенный набор условий: величина замаха, высота вбрасывания кубика и подобное. То же имеет место при любом случайном событии. Например, произойди отказ двигателя на вертолете на несколько секунд позже и можно было бы произвести вынужденную посадку не на лес, а на поляну. Не отвлекись командир воздушного судна в момент выполнения штурманом (через автопилот) разворота, не потерял бы он пространственной ориентировки ночью в крене. Точно также факты, которые невозможно учесть каждый раз конкретно, определяют промах при стрельбе или бомбометании. Примеры можно бесконечно множить. Именно для того, чтобы на множестве неучтенных мелочей определить закономерности, и применяется теория вероятностей.

Статистический массив АП имеет значительный объем: налет на парке однотипных ВС составляет нескольких десятков тысяч часов и полетов в год. В этом массиве АП в терминах теории вероятностей и математической статистики является событием редким [1]. Это означает, что вероятность события пропорциональна продолжительности промежутка времени: на самом деле интуитивно ясно, что чем дольше событий не было, тем более вероятно их появление. Во-вторых, в течение малого промежутка времени возникновение более одного события имеют вероятность высшего порядка малости по сравнению с вероятностью одного событием [2]. И, наконец, количества событий в непересекающиеся интервалы времени взаимно независимы [3].

При этих условиях распределение вероятности этих событий управляется законом Пуассона. А уж, коль скоро генеральная совокупность событий, из которой мы наблюдаем выборку, распределена по ***закону Пуассона***, то из этого со всей непреложностью следует, что интервалы между АП имеют ***экспоненциальное*** распределение.

Таким образом, для того, чтобы предугадывать наступление АП, необходимо на основании имеющейся достаточно объемной статистики определить (ее числовыми параметрами) генеральную совокупность, которой принадлежит располагаемая выборка.

Необходимо все же отдельно оговорить следующее: все это имеет смысл, если говорить об «***установившемся процессе***», то есть тогда, когда имеют место ***однородные*** условия эксплуатации, выполняются законы технической и летной эксплуатации в среднем одинаково по всей генеральной совокупности полетов. Невозможно ничего сказать в смысле прогноза, если на парке самолетов или вертолетов, насчитывающем две единицы, эксплуатация идет вопреки всем правилам, когда самолет перегружают не только выше разрешенных норм, но и превышая все физические законы. Как можно угадать происшествие и организовать профилактические мероприятия, если в гражданской авиации одной из стран СНГ в течение одной недели разбивают два однотипных грузовых самолета при очевидных нарушениях правил эксплуатации? Что можно сказать о прогнозе, когда в другой стране СНГ самолеты падают по несколько раз в год из-за перегруза, который даже такой надежный самолет, как Ил-76, технически допускающий перегрузы на 5...10 тонн, невозможно вывести на высоту эшелона, даже если и удалось взлететь вообще?

Само собой разумеется, что никакая самая представительная выборка, обладающая близкими с генеральной совокупностью характеристиками с большой доверительной вероятностью, не позволит сказать точно, что АП состоится в четверг 15-ого июля такого-то года в точке с такими-то географическими координатами. Такие предсказания – прерогатива экстрасенсов. Но мы говорим о науке, а не о шарлатанстве.

О прогнозе более уверенно можно говорить в том случае, когда выполняется стабильная эксплуатация на некотором парке однотипных ВС. Тогда можно попытаться обратить ***неизбежное*** в плохо ли, хорошо ли, но ***прогнозируемое*** цельное явление, по которому следует проводить профилактические мероприятия. Нельзя считать, что при этом проблема будет решена тотально. Но априорно ясно, что тотальная, безликая профилактика, основанная на командно-административных методах (непрерывном ужесточении требований, «разносах» и наказаниях), давно себя изжила.

Более прогрессивным методом все-таки следует считать попытку угадывания приближения неблагоприятного события на основе правильно обработанной предыстории, с тем, чтобы делать предупреждающие действия, конкретность которых также подсказывается статистикой. Ведь, в сущности, в таких упреждающих действиях и состоит практическое использование «теории операций», о которой ее основоположниками сказано, что она дает не лучшие советы там, где без нее никаких советов получить нельзя вообще.

1. Располагаемая статистика

Разветвленная система сбора информации об инцидентах и происшествиях, применяемая в Гражданской авиации, знала и знает сбои, особенно при учете инцидентов (в прошлом – предпосылок к авиационным происшествиям). Эти сбои порождались рядом причин:

- заведомая недобросовестность исполнителей;
- непонимание важности процесса учета;
- боязнь наказания за упущения,

и им подобным.

Однако, общее количество инцидентов, достигающее 1..3 тысячи в год по всему парку ВС, в силу самого объема статистики нивелировало эти сбои. Поэтому выборка, включающая в себя только сообщенные случаи, как это установлено исследованиями в Гражданской авиации и авиации Вооруженных сил, была репрезентативной и соответствовала своей генеральной совокупности.

Общая статистика в соответствии с законами сбора и учета информации систематизирована по типам ВС, по регионам их эксплуатации, по времени возникновения события (инцидента или происшествия) и другим значимым признакам. Полнота информации о более серьезных событиях (серьезные инциденты, авиационные происшествия без человеческих жертв, катастрофы) является вполне исчерпывающей. Более того, факторы происшествия, обусловившие его возникновение, в процессе расследования выявляются с возможной полнотой. Эти факторы регистрируются в базах данных и классифицируются в соответствии с действующими классификаторами.

Различные временные этапы эксплуатации ВС характеризуются разной степенью интенсивности авиационных событий. В начальный период эксплуатации нового типа ВС, как известно, выявляются его особенности, недоделки, неподготовленность персонала и т.п. По опыту начального этапа выполняются доработки с учетом результатов контрольно-серийных испытаний. И после этого (через 3...4 года) имеет место длительный этап, который мы условно назовем этапом «стационарной эксплуатации». Анализ статистики показывает, что на этом этапе имеет место значительный ежегодный общий (по парку) налет данного типа ВС, в течение длительного срока близкий к постоянному, и примерно постоянная величина «интенсивности событий», или, однозначно пересчитываемая, стабильная величина «среднего времени» между событиями.

В этом смысле имеет место положение, аналогичное положению из теории надежности технических систем, формулируемое как закон изменения по времени «интенсивности отказов λ». Типичный график показан на рис. 1.

Несмотря на то, что авиационную транспортную систему чисто технической можно считать только условно (60..80% факторов происшествий и 20…40% факторов инцидентов связано с проявлениями так называемого «человеческого фактора»), общая картина качественно сохраняется и в статистике авиационных событий.

Показанный на графике этап «старения», для авиационной транспортной системы размыт: пока ВС не списано, на нем выполняются все необходимые профилактические работы, доработки по бюллетеням, проводятся периодические испытания на соответствие техническим условиям и т.п. И поэтому ВС, имеющее «возраст» 15...20 лет должно иметь (и чаще всего имеет) те же технические характеристики, что и эталон. Но ведь и на новом самолете, вчера сошедшем со стапелей, при недобросовестной эксплуатации (технической или летной) может быть все, что угодно.

Таким образом, сегодня официальная статистика располагает по каждому типу ВС на «стационарном этапе» эксплуатации:

- точным описанием событий;
- их общим количеством;
- датой событий и, следовательно, их периодичностью, а также (для этапа «стационарной эксплуатации») общим ежегодным налетом на парк и общим числом полетов каждого типа ВС по всему его парку.

Зачем нам эти данные и как использовать их в целях профилактики безопасности полетов, мы рассмотрим ниже.

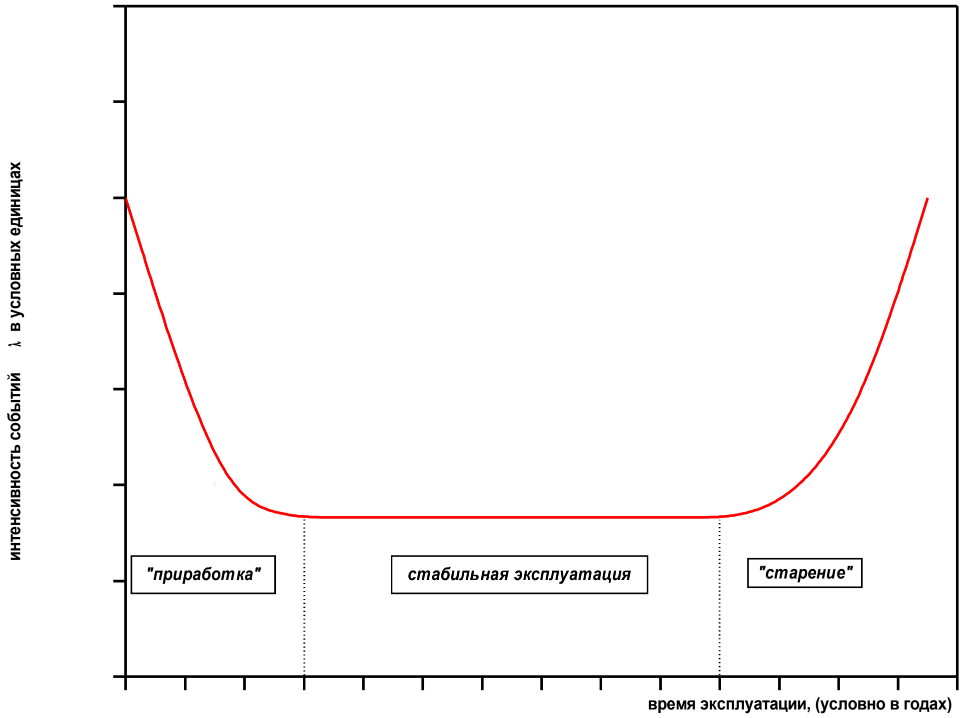

Рис.1 Иллюстрация процесса эксплуатации

2. Что может быть нужно эксплуатанту?

Предположим, что некая авиакомпания располагает небольшим парком ВС. Стоимость каждого настолько велика, что потеря каждого однозначно приведет к полному краху авиакомпании. Руководство авиакомпании отчетливо понимает, что в авиации рано или поздно может произойти АП или инцидент. Во время единого государственного руководства авиацией можно было интуитивно прогнозировать примерную периодичность событий. Кроме того, имелась информация по всей гражданской авиации. В настоящее время необходимая информация чаще всего является платной и поэтому не все руководители считают необходимым для себя ее закупать. Условия производственной деятельности также изменились: общий налет в авиакомпании стал меньше, чем ранее в производственном подразделении, полетов стало также меньше и, следовательно, события должны быть реже. А на сколько?

Всегда присутствовавшая задача – угадать тот период, когда следует ждать авиационное событие и предпринимать превентивные меры – усложнилась. В каком направлении их следует предпринимать? Какие мероприятия следует выполнить? Тривиальный ответ на вопрос – непрерывно – является неконструктивным, так как при этом не останется времени для основной работы по перевозкам.

На этот вопрос и пытается ответить настоящая статья.

Следует подчеркнуть, что статистические и вероятностные методы не могут позволить предугадать исход каждого конкретного полета. Они способны указать лишь общие закономерности. И оттого, что на Камчатке 20 января произошло выкатывание самолета, не следует, что 21 января в Иваново не произойдет отказ двигателя на взлете у самолета того же типа. Такой гарантии нет. Но вероятность его чрезвычайно мала. А методы теории оптимальных решений и прогнозирования предлагают тратить энергию и материальные ресурсы на предотвращение реальных, то есть наиболее вероятных опасностей.

Это опять-таки не значит (и это необходимо подчеркнуть отдельно!), что при фатальной неизбежности события следует его пассивно ожидать.

Общие закономерности выявлены на статистике эксплуатации с ее изъянами и сильными сторонами. И, значит***, практические рекомендации соответствуют примерно тем же условиям летной и технической эксплуатации***. Добросовестность в исполнении необходимых рутинных процедур, безусловно, отодвинет возможность приближения события, но это будет, что называется, «в запас».

3. Методы анализа имеющейся статистики

3.1. Оценивание интервалов между происшествиями

Как уже говорилось выше, возникновение каждого происшествия или инцидента есть событие случайное по всей совокупности подобных событий. Само возникновение факторов события, каждый из которых также имеет вполне определенную причину, также случайно. О них, как о случайных событиях, следует говорить потому, что самих этих причин достаточно много для того, чтобы их случайное сочетание привело к происшествию или инциденту.

Иронический «закон Мэрфи» утверждает, что «если неприятность физически может осуществиться, то она непременно случиться». Особенно это возможно, если «неприятность» предопределена ошибками человека, среди которых могут быть и непредсказуемые (так называемые «спорадические»). Но и технические причины, составляющие 20...40% факторов, также не всегда можно предугадать.

Вероятность возникновения неблагоприятных событий управляется законом Пуассона, и, следовательно, среднее время между событиями распределено экспоненциально. При этом среднее время между событиями τ и «интенсивность событий» λ связаны между собой известным соотношением:

$$\lambda = {}^{1}/_{\tau} \text{ или } \tau = {}^{1}/_{\lambda} \qquad (1)$$

И тогда для начала необходимо эти параметры узнать.

Обратимся к имеющейся статистике. Она обычно представлена в базе данных в ниже приведенной форме. Процитируем фрагмент.

«...20.10.89 – Катастрофа - Ил-76ТД - № 76466 – Россия - р-н а/п Ленинакан - Ульяновский Центр ГАСЭВ

При заходе на посадку в горной местности в процессе выполнения 3-го разворота самолет столкнулся с возвышенностью на высоте 1800 м и полностью разрушился.

ПРИЧИНЫ-ФАКТОРЫ:

1. Ошибка в установке на барометрических высотомерах левого и правого пилотов давления аэродрома посадки 736 мм рт ст вместо 636 мм рт ст, что привело к завышению показаний высотомеров на 1100 м и снижению самолета ниже $H_{без.}$ в районе 3-го разворота.

2. Неиспользование датчиков р/высотомеров «опасная Н», что лишило экипаж дополнительной информации о нарушении $H_{без.}$

3. Невыполнение требований РЛЭ Ил-76 по энергичному переводу самолета в набор при срабатывании сигнализации «ССОС».

27.03.90 – Катастрофа - Ил-76МД – 78781 – Россия - р-н а/п Кабул Сводный авиаотряд УзУГА

При выполнении полета по маршруту: Ташкент – Кокайты – Кабул в процессе снижения по схеме а/д Кабул, в горной местности, в районе 3-го разворота с высоты 4800 м (3000 м от уровня аэродрома) произошло сваливание самолета. Самолет, вращаясь вокруг продольной оси (крутая нисходящая спираль), столкнулся с землей, разрушился и сгорел.

ПРИЧИНЫ-ФАКТОРЫ:

1. Невыдерживание экипажем режимов полета по скорости при полете с убранной механизацией в развороте с креном до 40°.

2. Недостаточный контроль со стороны членов экипажа за параметрами полета, что привело к нарушению установленных ограничений по допустимому углу атаки и минимально допустимой скорости полета.

3. Отсутствие навыков пилотирования на больших углах атаки, распознавания сваливания и вывода из сваливания, обусловленные несовершенством подготовки экипажей к действиям в особой ситуации.

12.06.90 – АПБЧЖ - Ил-76МД – 86905 - Узбекистан - КАБУЛ Узб УГА

При пролете горного хребта с Н=4700м зенитной ракетой антиправительственной группы поражено ВС в 34 км от Кабула на высоте Н=7750 м. При взрыве образовалась пробоина 2х1,5 м в левом борту фюзеляжа, ВС при аварийной посадке на ГВПП с 2-мя выключенными двигателями из-за отсутствия сигнала о положении шасси получил значительное повреждение…»

И так далее…

Изучение базы данных дает возможность составить рабочие таблицы для последующего статистического анализа. Так на основании материалов (а их полнота, как правило, исчерпывающая) можно составить соответствующие таблицы.

Таблица 1

Первичная обработка базы данных для статистического анализа

№№ п/п	Дата АП	Дата АП по ЧФ	Дата АП по техн. фактору	Дата АП по фактору «среда»
1	01.01.79	01.01.79		
2	15.08.81	15.08.81		
3	07.07.88		07.07.88	--
4	20.10.89	20.10.89		
5	27.03.90	27.03.90		
6	12.06.90			12.06.90
7	24.05.91	24.05.91		24.05.91
8	21.04.93	21.04.93		
9	31.12.94	31.12.94		
10	31.10.95	31.10.95		
11	05.04.96	05.04.96		
12	06.06.96	06.06.96		
13	19.08.96		19.08.96	
14	12.11.96	12.11.96		
15	25.01.97	25.01.97		
16	13.07.98	13.07.98		
17	17.07.98	17.07.98		
18	10.07.99	10.07.99		
19	26.07.99	26.07.99		
20	18.04.01		18.04.01	
21	14.07.01	14.07.01		
22	31.01.03	31.01.03		
23	19.02.03	19.02.03		
24	04.03.04	04.03.04		
25	18.05.04	18.05.04		
26	11.12.04		11.12.04	
27	30.12.04	30.12.04		
28	03.02.05	03.02.05		
29	23.03.05	23.03.05		

Приведенная в таблице статистика обеспечивает вычисление интервалов между происшествиями. На самом деле, легко получить интервалы между АП, которые мы и приведем в таблице 2.

Приведенные в таблице 2 интервалы (3 и 4-ый столбцы) в терминах теории надежности суть измеренные значения «времени наработки на отказ», а в нашем случае – интервала времени между последовательными происшествиями. Среднее время «наработки на отказ» определяется как среднее измеренных случайных значений τ_i, где i – номер замера, а τ_i – соответствующий ему интервал.

Как известно, средняя «наработка на отказ» определяется как:

$$T_{сред} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\tau_i \, , \tag{2}$$

где n – количество случаев.

В столбцах 5 и 6 приведены полученные статистические плотность и кумулятивная функция распределения приведенной выборки.

Таблица 2

Интервалы между происшествиями

№№ п/п	Дата АП	Интервалы между АП, (дней)	Ранж. интерв. между АП, (дней)	Плотность вероятности	Кум. функция распр.
1	2	3	4	5	6
2	15.08.81	957	4	0	0
3	07.07.88	2518	16	0,0345	0,071
4	20.10.89	470	19	0	0,107
5	27.03.90	158	19	0.069	0,143
6	12.06.90	77	35	0,0345	0,179
7	24.05.91	346	48	0,0345	0,214
8	21.04.93	698	62	0,0345	0,25
9	31.12.94	619	74	0	0,286
10	31.10.95	304	74	0,069	0,321
11	05.04.96	157	75	0,0345	0,357
12	06.06.96	62	77	0,0345	0,393
13	19.08.96	74	85	0,0345	0,429
14	12.11.96	85	87	0,0345	0,464
15	25.01.97	74	157	0,0345	0,5
16	13.07.98	534	158	0,0345	0,536
17	17.07.98	4	207	0,0345	0,571
18	10.07.99	358	304	0,0345	0,607
19	26.07.99	16	346	0,0345	0,643
20	18.04.01	632	358	0,0345	0,679
21	14.07.01	87	379	0,0345	0,714
22	31.01.03	566	470	0,0345	0,75
23	19.02.03	19	534	0,0345	0,786
24	04.03.04	379	566	0,0345	0,821
25	18.05.04	75	619	0,0345	0,857
26	11.12.04	207	632	0,0345	0,893
27	30.12.04	19	698	0,0345	0,929
28	03.02.05	35	957	0,0345	0,964
29	23.03.05	48	2518	0,0345	1

Приведем примерный вид кумулятивной функции распределения интервалов между происшествиями. На рис. 2 приведен примерный вид такого графика. Из графика видно, что в целом эмпирическая (ступенчатая) линия близка к ее экспоненциальной аппроксимации.

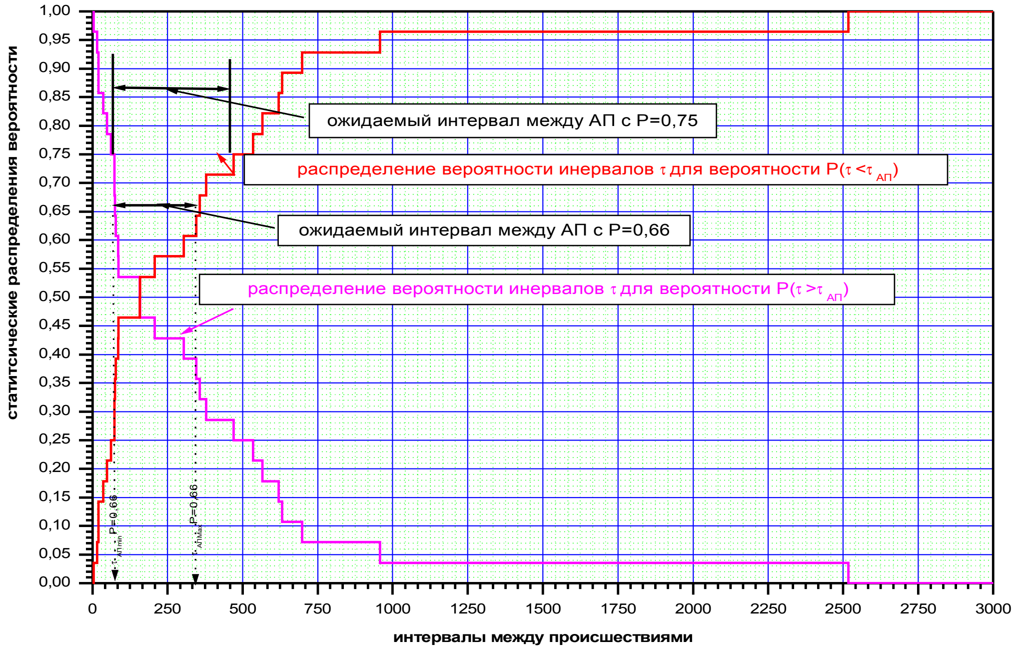

Рис.2 Распределение интервалов между происшествиями

Из графика рис. 2 видно, что ломаная, представляющая собой функцию распределения интервалов между АП, близко описывается возрастающей экспонентой вида:

$$F(\tau) = 1 - \exp\{-\frac{\tau}{T_{сред}}\}, \tag{3}$$

где: $F(\tau)$ – функция распределения;

τ — интервал между авиационными происшествиями;

$T_{сред}$ – постоянная времени экспоненты, среднее время между событиями.

Эта «возрастающая» экспонента ограничивает справа те интервалы времени между событиями, время наступления которых ***не более тех значений***, что ограничены кривой. И, значит, событие должно случиться не позже ограниченного времени. С другой стороны легко построить распределение тех значений интервалов, которые соответствуют событию «происшествие произойдет ***не раньше*** того же отрезка времени», то есть:

$$G(\tau) = 1 - F(\tau) = \exp\{-\frac{\tau}{T_{сред}}\} \tag{3а}$$

И таким образом ожидаемое событие может произойти при выбранной вероятности в течение времени, значение которого ограничено слева кривой $F(\tau)$, а справа – $G(\tau)$, как показано на рис. 2.

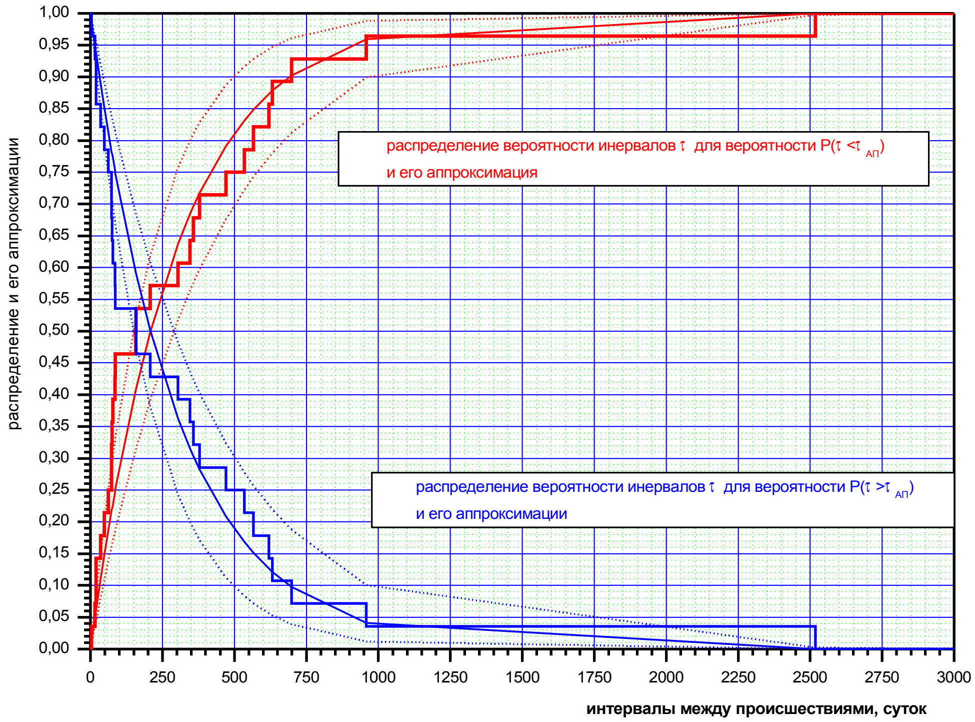

Рис.3 Распределение интервалов между происшествиями и их аппроксимация

Как известно из теории надежности, среднее время между событиями («среднее время наработки на отказ») может быть вычислено по формуле (2). При этом полученная оценка является случайной величиной, и ее доверительные границы существенно зависят от объема выборки. Для экспоненциально распределенной величины при объеме выборки менее 30 наблюдений оценка распределена также по закону экспоненты [1]. На графиках рис. 3 показаны доверительные границы математического ожидания оценки для доверительной вероятности $\beta=0,9$.

На графиках рис. 4 показаны коэффициенты, на которые следует умножить величину оценки математического ожидания для получения верхней и нижней с указанной доверительной вероятностью оценки математического ожидания среднего времени интервала между происшествиями при имеющейся статистике.

Именно,

$$\tau_{сред\ min} = R_1 * T_{сред}$$

$$\tau_{средMax} = R_3 * T_{сред} \qquad (4)$$

где: R_1, R_3 — коэффициенты из графиков рис. 3 в зависимости от объема выборки;

$\tau_{сред\ min}$, $\tau_{средMax}$ — нижняя и верхняя границы оценки;

$T_{сред}$ — вычисленное из наблюдений среднее значение интервалов.

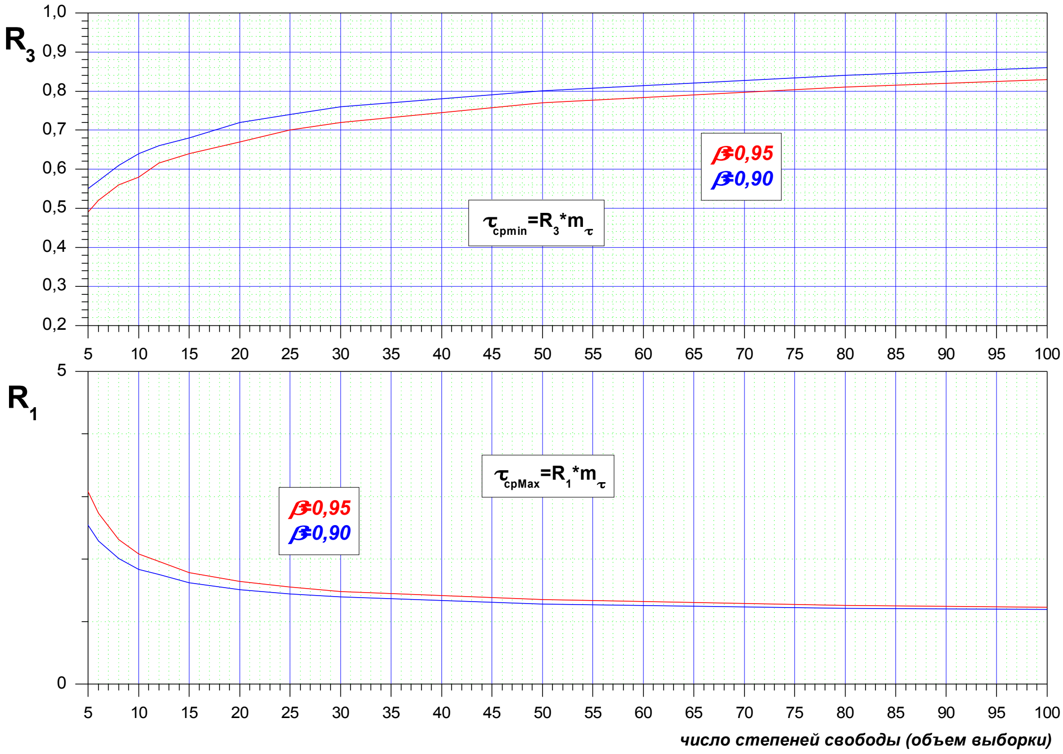

Рис.4 Доверительные границы с доверительной вероятности 0,9 и 0,95 для $\tau_{сред}$ экспоненциального распределения (по Я.Б.Шору))

Если выборка достаточно представительна и число наблюдений превышает 30, распределение оценки становится близким к гауссову. Поэтому распределение среднего более или менее точно управляются законом Стьюдента. Тогда доверительные границы могут быть определены по хорошо известным таблицам распределения Стьюдента (например, [2].

Для наших целей необходимо получить область вероятных интервалов между происшествиями, для чего график рис. 2 нужно дополнить аппроксимирующей распределение кривой и ее границами, соответствующими верхней и нижней оценками (рис. 4).

Теперь (по замыслу!) из графиков рис. 2 и рис. 3 при выбранной вероятности можно определить интервал и, прибавив его значение к дате последнего события определить, ***не позже (!!!)*** какой даты с выбранной вероятностью следует ожидать неблагоприятного события

Выделенные жирным курсивом слова имеют важное значение.

По определению функция распределения интервалов указывает значение вероятности, при которой интервал будет ***не больше значения, ограниченного кривой***.

Таким образом, если в условиях примера из графика рис. 3 мы получаем, что если выбрать значение вероятности P=0,75 интервал между происшествиями составляет 90…406 дней. И тогда, если «крайнее» происшествие произошло, к примеру, 01 февраля, то следующего с указанной выше вероятностью можно ожидать **не раньше**, чем 30 апреля.

3.2. Оценивание вероятности следующего происшествия

Рассмотрим АП как случайную последовательность неких импульсов по оси времени. На самом деле, если обозначить временную ось и в моменты времени, соответствующие реальному происшествию, а факт происшествия обозначить импульсом (рис. 5), то мы получим их последовательность, где отрезки времени между импульсами суть паузы в импульсном потоке υ_i [1].

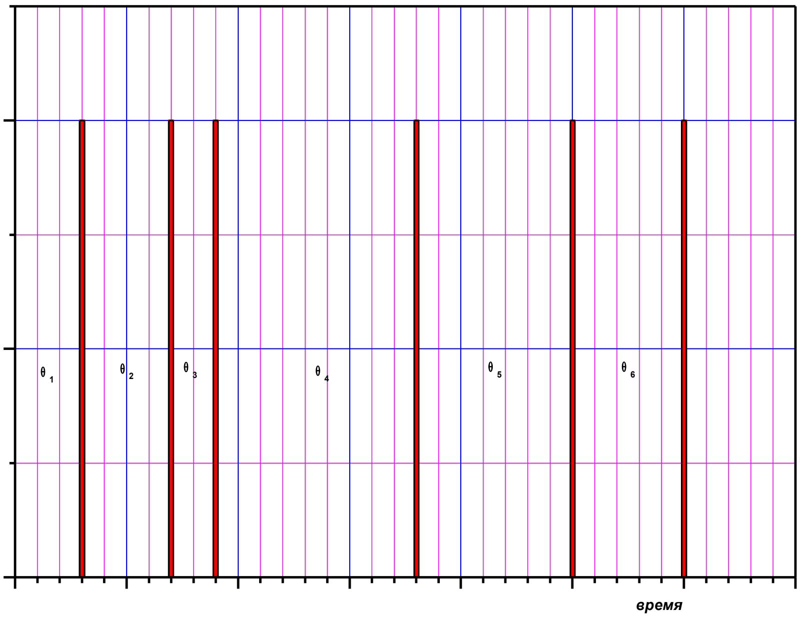

Рис.5. Интерпретация событий последовательностью импульсов

По определению вероятность $p_0\ (t/\tau)$ появления на отрезке времени $[\tau,\ t+\tau]$ импульса при условии, что на отрезке $[0,\ \tau]$ имел место, по крайней мере, один импульс, определяется функцией Пальма:

$$f_0(t) = \frac{1}{\lambda}\lim_{\tau\to 0}\frac{p_0(t/\tau)}{\tau}. \tag{5}$$

И вообще,

$$f_k(t) = \frac{1}{\lambda}\lim_{\tau\to 0}\frac{p_{\le k}(t/\tau) - p_{\le k-1}(t/\tau)}{\tau}. \tag{6}$$

Отрезки времени $[0,\ \tau]$ в терминах, введенных выше, суть интервалы между происшествиями. Как было показано, их величины распределены по экспоненциальному закону и поэтому плотность их распределения есть:

$$w(\vartheta) = \lambda e^{-\lambda\vartheta}. \tag{7}$$

И тогда:

$$\boldsymbol{f_0(t) = \int_t^{\infty} w(\vartheta)\,d\vartheta = e^{-\lambda t}}. \tag{8}$$

Как известно [3], справедливы следующие соотношения:

$$\frac{dP_0}{dt} = -\lambda f_0(t); \tag{9}$$

Опуская подробные выкладки и обращаясь к [3], мы получим:

- вероятность того, что за период t не будет ни одного происшествия, равна $P_0=e^{-t/T}$;
- вероятность того, что за период t будет не больше одного происшествия, равна $P_1=1-e^{-t/T}$;
- вероятность того, что за период t будет не больше двух происшествий, равна $P_2=1-(t/T+1)e^{-t/T}$.

где $T=1/\lambda$ – постоянная времени экспоненты (7).

На рис. 6 показаны эти зависимости. Из графиков, в частности, видно, что при интервале времени после последнего происшествия, равном T**,** ни одного происшествия на будет с вероятностью $P_0=0,36$, одно происшествие может быть с вероятностью $P_1=0,63$, а два с вероятностью $P_2=0,265$. Или, решая обратную задачу, мы получим, что с вероятностью $0,5$ ни одного или одно происшествие может произойти через время $0,7T$, а два – через $1,66T$.

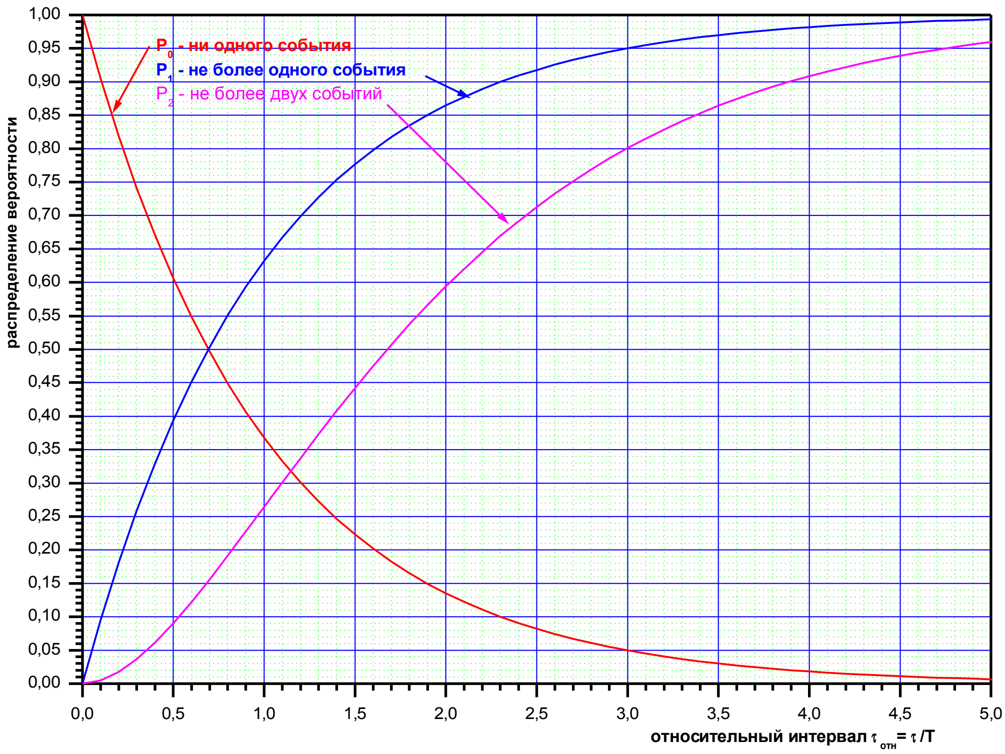

Рис.6. Распределение вероятности событий как импульсного потока

3.3. Оценивание величины среднего налета между происшествиями

В условиях стабильной эксплуатации, когда в среднем годовой налет на данном типе ВС из года в год примерно одинаков, величина налета между происшествиями пропорциональна интервалу между ними. Это свойство соблюдается тем точнее, чем больше парк ВС, чем стабильнее условия эксплуатации, то есть, чем регулярнее перевозки.

В случае конкретного исследования на материалах одной авиакомпании или одного территориального управления, когда для каждого типа ВС налет известен точно, задача определения прогнозируемого налета перед следующим происшествием становится более конкретной и более простой.

При отсутствии подобных сведений мы вынуждены делать более или менее реальные предположения. Поскольку данная работа имеет методический характер, мы вынуждены смириться с этими предположениями, имея в виду, что при решении конкретной прикладной задачи условность будет устранена.

Итак, введем некую функцию $\Theta_{сут}(t)$, которая описывает фактический суточный налет. Тогда по известным интервалам между происшествиями (табл. 2, колонка 3) можно определить налет между авиационными происшествиями по простой формуле:

$$\Theta_{Ani} = \Theta_{сут} * \tau_{i}, \qquad (10)$$

где: Θ_{Ani} – налет между происшествиями;

$\Theta_{сут}$ – суточный налет на данном типе на всем парке или в пределах предприятия;

τ_i – интервал между последовательными происшествиями.

И тогда, имея статистику Θ_{Ani} можно обратиться к прогнозу вероятности.

Возможны следующие варианты:

- $\Theta_{сут}(t)$ ~ *const* или является примерно детерминированной функцией времени. Это соответствует либо «стационарной» (регулярной) эксплуатации, либо эксплуатации, детерминированной сезонными изменениями расписания, когда интенсивность полета определяется изменениями расписания.
- $\Theta_{сут}(t)$ является стохастическим и существенно меняется в течение времени.

В первом случае закон распределения близок к экспоненциальному (особенно, при $\Theta_{сут}(t)$ ~ *const)*. Во втором случае необходимо определить закон распределения в виде композиции экспоненциального закона и закона распределения стохастических изменений суточного налета.

Используя имеющиеся фактические данные, покажем, как это выполняется. Как упоминалось выше, при $\Theta_{сут}$ (t) ~ *const* распределение величины налета между происшествиями примерно пропорционально интервалу между ними. Однако, это не всегда так. На графике рис. 7 и в таблице 3 показана зависимость налета и интервалов между происшествиями, построенная для самолетов Ил-76.

Можно построить корреляцию между налетом и интервалами между событиями. Это показано на рис. 7а.

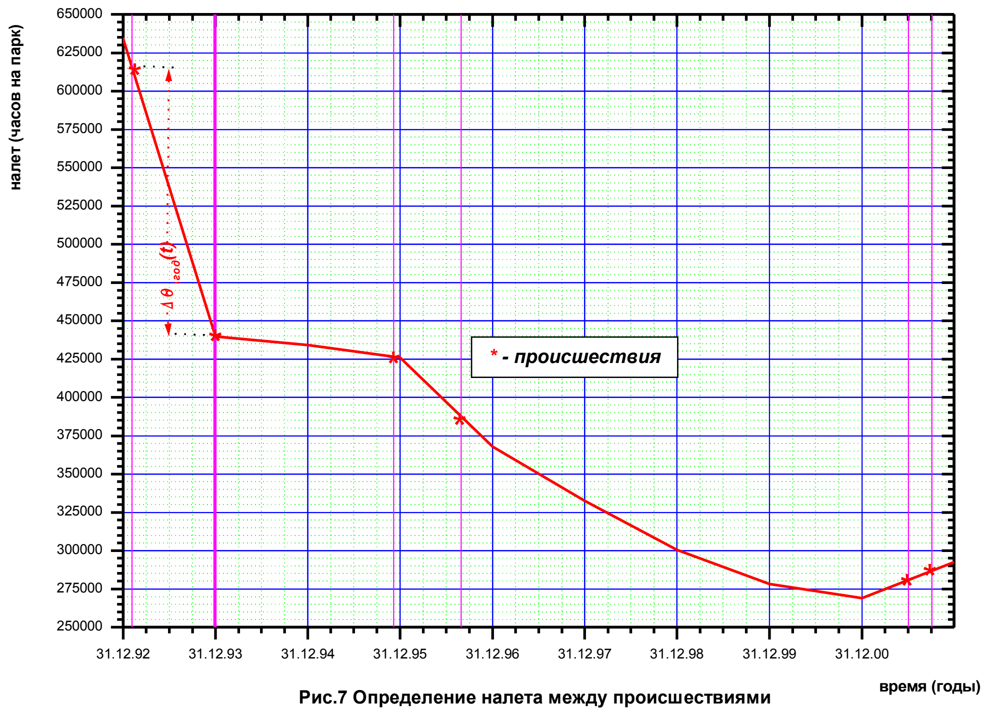

Рис.7 Определение налета между происшествиями

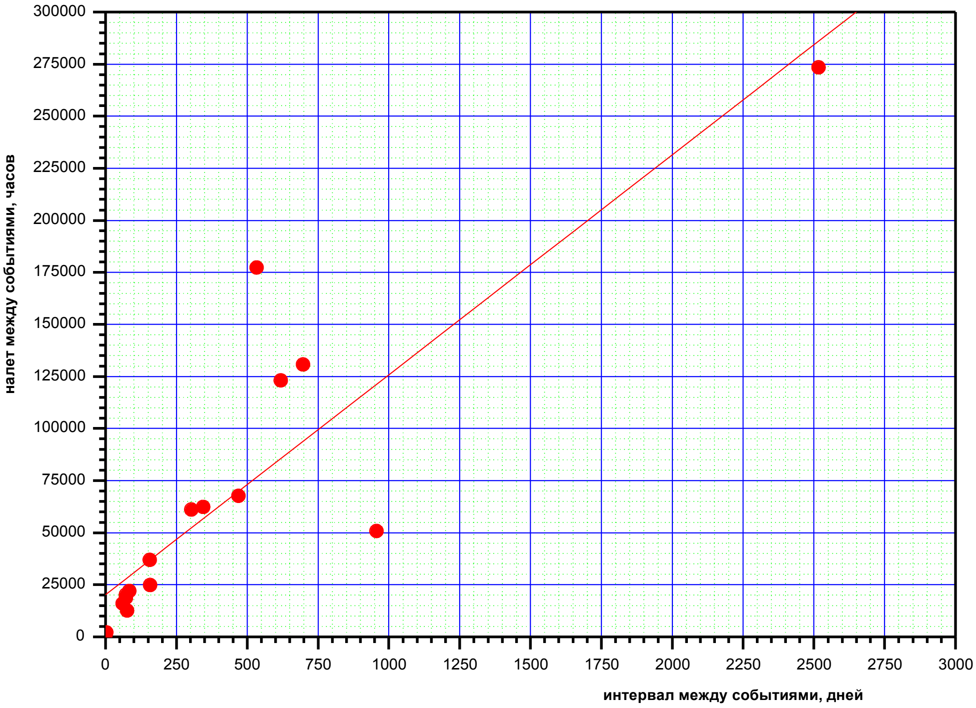

Рис.7а. Зависимость налета на парке от интервалов между событиями

Из рис. 7а видно, что такая зависимость существует и она похожа на линейную, так как коэффициент (линейной) корреляции достаточно высок, но все-таки зависимость не является функциональной.

При определении закона распределения налета между происшествиями составим и обратимся к данным таблицы 3.

Таблица 3

Год	Годовой налет парка	Нарастающий итог	Дата АП	Налет на АП
31.12.78	6700	6700	01.01.79	0
31.12.79	17100	23800	15.08.81	50728
31.12.80	17600	41400	07.07.88	273290
31.12.81	25900	67300	20.10.89	67592
31.12.82	30610	97910	27.03.90	24731
31.12.83	33365	131275	12.06.90	12435
31.12.84	38420	169695	24.05.91	62151
31.12.85	43046	212741	21.04.93	130578
31.12.86	45044	257785	31.12.94	122979
31.12.87	47235	305020	31.10.95	61028
31.12.88	49857	354877	05.04.96	36861
31.12.89	54070	408947	06.06.96	15816
31.12.90	59573	468520	19.08.96	18736
31.12.91	73613	542133	12.11.96	21900
31.12.92	63868	606001	25.01.97	20165
31.12.93	72756	678757	13.07.98	177204
31.12.94	72334	751091	17.07.98	2000
31.12.95	73325	824416		
31.12.96	93509	917925		
31.12.97	113936	1030000		

31.12.98	134000	1170000

На основании этих данных построим соответствующие функции распределения.

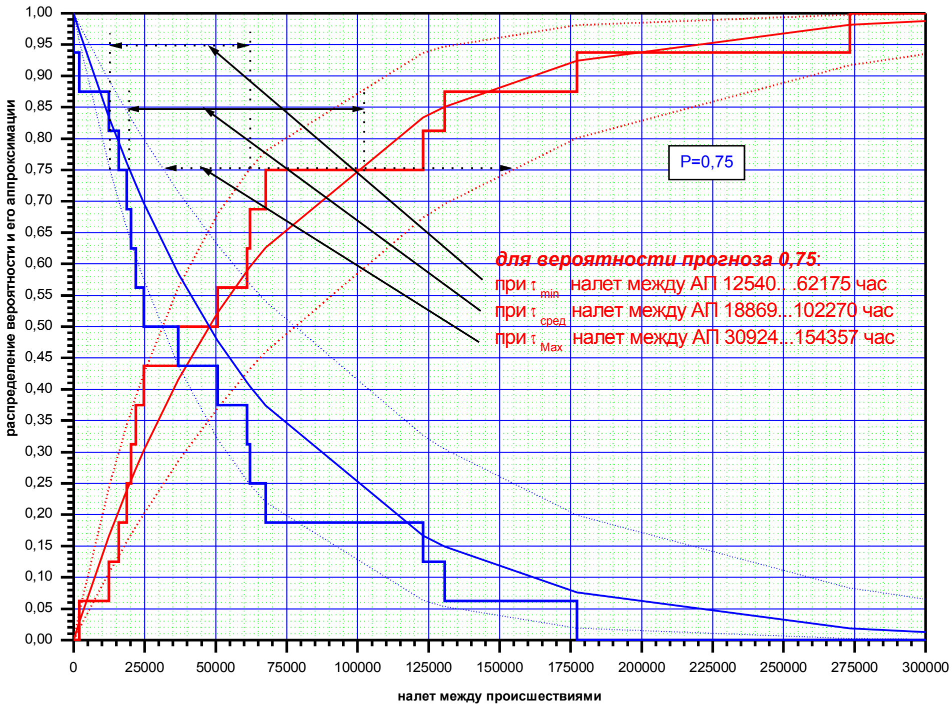

Рис.8 Распределение налета между происшествиями и его аппроксимации

На графиках рис. 8 показано это распределение с доверительными границами для доверительной вероятности β=0,95. Из графиков видно, что распределение налета между происшествиями в данном случае близко к экспоненциальному, что позволяет оценить диапазон величины налета от одного до другого происшествия.

Указанным способом определяется налет между происшествиями. Так, на рис. 8 для вероятности *P=0,75* получается, что после последнего события следующее может произойти в диапазоне налетов 61640…152686 часов.

3.4. Оценивание вероятности происшествия по причине воздействия отдельных факторов

Попытаемся оценить, какими из оговоренных ранее факторов («человеческий фактор», «техника» или «среда») будет определяться «следующее происшествие», понимая при этом, что достоверность этого прогноза в вероятностном смысле мала.

Итак, пусть вероятность («частость») события определена изложенными выше методами. Это событие в качестве факторов (как это установлено апостериорно по имеющейся статистике) содержит $n_{чф}$ случаев, когда присутствовали ошибки экипажа («человеческий фактор»), $n_{техн}$ случаев отказов техники («технический фактор»), и $n_{среда}$ случаев, когда факторами явились другие причины (сдвиг ветра, не оправдавшийся прогноз, ошибка при управлении полетом со стороны служб ОВД и прочее).

Тогда, имея общее число событий *N,* обозначим «частость» каждого фактора как:

$$\nu_{чф} = \frac{n_{чф}}{N};$$

$$\nu_{тухн} = \frac{n_{техн}}{N};$$

$$\nu_{сред} = \frac{n_{сред}}{N}$$

(11)

Кроме того, возможны сочетания нескольких факторов, когда в происшествии имеют место одновременно разные из трех перечисленных групп. Тогда, очевидно, следует принять во внимание еще и следующие «частости»:

$$\nu_{чф-техн} = \frac{n_{чф-техн}}{N};$$

$$\nu_{чф-среда} = \frac{n_{чф-среда}}{N}; \qquad (12)$$

$$\nu_{среда-техн} = \frac{n_{среда-техн}}{N}$$

где «частости» с двойным обозначением определены сочетанием указанных в нижнем индексе факторов.

На имеющейся статистике эти «частости» получены на сравнительно малой выборке. Поэтому необходимо оценить их достоверность.

Как известно [4], среднее значение «частости» асимптотически (с увеличением объема выборки) приближается к вероятности. В соответствии с правилом больших чисел и теоремой Муавра–Лапласа распределение значений «частости» асимптотически нормально («гауссово») с математическим ожиданием, равным вероятности, а дисперсия ее оценки s выражается величиной:

$$s_i = \sqrt{N\nu_i(1-\nu_i)}, \qquad (13)$$

где s_i – дисперсия оценки *i*-той «частости» n_i а N – объем выборки.

Тогда с доверительной вероятностью $\beta = 0,997$ значение «частости» будет находиться в пределах:

$$n_i = n_{i0} \pm 3s, \qquad (14)$$

где n_{i0} – математическое ожидание (измеренное значение) оценки.

Посмотрим теперь, что это значит, на примере таблицы 1. Из данных, приведенных в таблице 1, видно, что:

- общее происшествий за рассмотренный период $N=29$;
- в том числе по причинам, связанным с «человеческим фактором» $n_{чф}=24$**,** тогда $\nu_{чф0}=0,828;$
- в том числе по причинам, связанным с техникой $n_{техн}=4$, $\nu_{техн0}=0,138;$
- в том числе по причинам, связанным со «средой» $n_{среда}=2$, $\nu_{среда0}=0,068;$
- в том числе по причинам, связанным одновременно со «средой» и ЧФ одновременно $n_{чф\_среда}=1$, $\nu_{чф\_среда0}=0,034$.

> ***Примечание**: Необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что сумма «частостей» превосходит 1. Поясним это. Дело в том, что в одном случае (24.05.91) проявились одновременно 2 фактора – «человеческий» и «среда» и в формуле условной вероятности (при условии, что происшествие имело место) противоречий не будет. На самом деле, P(ЧФ, Техн, Сред)=P(ЧФ)+P(Техн)+P9Сред)–P(ЧФ–Сред).*

Тогда на приведенной статистике мы имеем:

- $n_{чф}=24\pm6,15$, то есть, случаев, когда в происшествии имел место «человеческий фактор», нужно ожидать в диапазоне от *18* до *30* случаев.

- $n_{техн}=4\pm5,57$, то есть, случаев, когда в происшествии имел место фактор техники, нужно ожидать в диапазоне от *0* до *10* случаев.
- $n_{среда}=2\pm4,1$, то есть, случаев, когда в происшествии имел место фактор среды, нужно ожидать в диапазоне от *0* до *6* случаев.
- и, наконец, $n_{чф\_среда}=1\pm0,983$, то есть, случаев, когда в происшествии одновременно имели место факторы «ЧФ» «среда», нужно ожидать в диапазоне от *0* до *2* случаев.

Или, переходя к «частостям», мы имеем:

- $v_{чф}=0,828\pm0.212;$
- $v_{техн}=0,138\pm0,192;$
- $v_{среда}=0,068\pm0,002;$
- $v_{чф\_среда}=0,034\pm0,001.$

Тем самым мы можем в ожидании авиационного события предполагать количественное выражение для оценки факторов, предопределивших это событие.

Выводы

1. Разработанные методы позволяют оценить на основании имеющейся статистики ожидаемое наступление авиационного события.
2. Методы могут дать приемлемые для профилактики оценки времени наступления события при условии «однородных» условий эксплуатации, то есть, при условии примерно одинаковых условий на исследуемом парке ВС.
3. Достоверность методов существенно зависит от объема априорной информации об имевших место событиях в части ее объема и данных расследования, определивших факторы, предопределившие эти события. Таким образом, чем больше авиационных событий содержит статистика эксплуатации, тем достовернее прогноз ожидаемого.
4. Методы оценки даты наступления неблагоприятного авиационного события по обработанным данным о временных интервалах между событиями позволяют в зависимости от требований к достоверности прогноза могут указать дату вероятного их наступления с погрешностью в 1…2 квартала.
5. Использование метода прогнозирования по величинам интервалов и налета между событиями требует точного знания динамики изменения налета за предшествующий период и в совокупности с информацией по всему парку однотипных ВС может дать возможность прогноза для отдельно взятой авиакомпании.
6. Методы могут быть применены для пробных расчетов для прогнозирования не только АП, но и инцидентов, а также иных событий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, № гранта 06-08-01518

Литература

1. *Шор Я.Б.* Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.: Советское радио. 1962.
2. *Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н., Коровина И.А.* Справочник по вероятностным расчетам. М.: Военное издательство МО СССР. 1970.
3. *Седякин Н.М*. Элементы теории случайных импульсных потоков. М. 1965.
4. *Ван дер Варден Б.Л.* Математическая статистика. М.: Иностранная литература. 1960.