

УДК 629.7
ББК 39.53

ВЛИЯНИЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ПЕРСОНАЛА ЗА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРЕДПОСЫЛОК К ЛЕТНЫМ ПРОИСШЕСТВИЯМ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ

Варюхина Е. В.¹

(Московский физико-технический институт, Москва)

Клочков В. В.²

(ФГБУН Институт проблем управления РАН, Москва)

Значительная часть аварий и катастроф в мире связана с человеческим фактором, следовательно, наиболее очевидным представляется ужесточение ответственности персонала за создание предпосылок к происшествиям. Тем не менее, как показал анализ представленной в данной работе математической модели, в начале периода эксплуатации новой технической системы целесообразно смягчить ответственность персонала за возникновение нештатных ситуаций, во избежание утаивания ими важной информации, которая может быть использована для совершенствования системы.

Ключевые слова: выявление предпосылок к авиационным происшествиям, ответственность персонала, безопасность полетов, эффект обучения, экономико-математическое моделирование, авиатехника

1. Введение

Поскольку значительная часть *авиационных происшествий* (АП), т.е. аварий и катастроф, как в России, так и за рубежом связана с так называемым «человеческим фактором» (см., на-

¹ *Екатерина Витальевна Варюхина, аспирант (eyebrow@yandex.ru).*

² *Владислав Валерьевич Клочков, доктор экономических наук, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник (vlad_klochkov@mail.ru).*

пример, [3]), важным направлением повышения безопасности полетов традиционно представляется ужесточение ответственности летного, технического персонала, наземных служб за создание предпосылок к происшествиям. В то же время более детальный анализ причин и обстоятельств авиационных происшествий показывает, что в реальности воздействие «человеческого фактора» на безопасность полетов чрезвычайно многообразно. В целом ряде случаев именно неформальный подход экипажа, его нестандартные решения и действия позволяли предотвратить возможные авиационные происшествия, в том числе с тяжелыми последствиями. Кроме того, не следует думать, что все случаи негативного проявления «человеческого фактора» связаны с преднамеренным нарушением правил выполнения полетов, руководства по летной эксплуатации и т.п. Во многих случаях формально неверные действия экипажа вызваны эргономическим несовершенством воздушного судна (ВС), сложностью операторской работы, сложными общими условиями труда экипажей, его неудовлетворительной организацией и т.п. То есть само по себе ужесточение дисциплины недостаточно для повышения безопасности полетов – необходимо устранение описанных системных проблем. Тем более что летный экипаж, как правило, и без дополнительных санкций ощущает ответственность за безопасное выполнение полетов, поскольку в случае авиационного происшествия понесет ущерб наравне с пассажирами.

Кроме того, на ранних стадиях эксплуатации новых типов изделий, как правило, наблюдается повышенная интенсивность отказов по причине *конструктивно-производственных недостатков* (КПН). Закономерности развития технических систем таковы, что КПН устраняются постепенно, по мере накопления опыта. То есть в отношении повышения надежности действует *эффект обучения*, известный во многих областях человеческой деятельности (см., например, работы, посвященные эффектам обучения в производстве авиатехники [1, 4, 5]).

Таким образом, интенсивность предпосылок к авиационным происшествиям может и должна снижаться по мере накопления опыта – на этом и основана система обеспечения безопасности полетов, сложившаяся в развитых авиационных державах,

в том числе и в нашей стране. Однако важно подчеркнуть, что важно не столько накопление опыта как такового, сколько его осмысление и анализ. Эти процессы возможны лишь при наличии обратных связей между эксплуатирующими технику специалистами – прежде всего, летным и техническим составом – и разработчиками авиатехники, а также органами управления, отвечающими за организацию летной работы и т.п.

Однако именно эта обратная связь может ослабевать в силу следующей проблемы. Далеко не все предпосылки к авиационным происшествиям действительно приводят собственно к происшествию или к такой особой ситуации (ОС), которая стала известной многим заинтересованным лицам – наземным службам, руководству авиакомпании, ее летной и инженерно-авиационной служб, регулирующим органам и т.п. Многие ОС имеют ограниченное проявление и локализируются на уровне экипажей ВС (кроме того, многие предпосылки к авиационным происшествиям вообще проходят скрытым образом, оставаясь незамеченными даже экипажем). Их анализ, централизованное обобщение на уровне производителя ВС и авиационных властей страны могли бы способствовать накоплению опыта и устранению КПН авиатехники, системных проблем в сфере безопасности полетов и т.п. Однако они, как правило, не делаются достоянием гласности, поскольку экипаж опасается санкций за неправильные действия (в тех случаях, когда именно они, а не КПН или действие внешних сил, будут признаны причиной возникновения ОС). При этом следует подчеркнуть, что объективный рассказ экипажа об обстоятельствах ОС, – возможно, сопровождаемый детальным анализом технического состояния приземлившегося ВС и средств объективного контроля – может быть гораздо информативнее, чем расследование авиационного происшествия с тяжелыми последствиями, которые затрудняют и восстановление соответствующей информации.

Разумеется, экипаж мог бы проявить сознательность и мыслить стратегически: его частный опыт внесет вклад в общий массив знаний и поспособствует повышению безопасности полетов в будущем, в том числе и для данного экипажа. Но, во-первых, далеко не всегда такая сознательность и стратегичность мышления проявляется на практике. Во-вторых, имеет место

хорошо изученная проблема неэффективности инвестирования в общественное благо (безопасность полетов) по сравнению с угрозой частных потерь (санкций), причем привлекательность работы об общем благе низка, поскольку любой конкретный экипаж – лишь один из многих, и его персональный вклад может быть невелик. Зато возможные санкции, если экипаж будет признан виновным в возникновении ОС, касаются его самым непосредственным образом.

В связи с этим со стороны специалистов-практиков звучат парадоксальные, на первый взгляд, предложения: снять с экипажей ответственность за возникновение ОС, о которых они сами рассказали, и, тем самым, ускорить накопление опыта эксплуатации за счет многочисленных ОС, локализованных на уровне экипажей. Иначе говоря, предлагается *декриминализация* расследования предпосылок к авиационным происшествиям, см. [2]. Разумеется, она должна касаться не только локализованных ОС, но и явных. Во-первых, потому что иначе складывалась бы парадоксальная и явно несправедливая ситуация: если ОС стала достоянием гласности – вне зависимости от последующих действий экипажа возможно наказание, в то время как, добровольно рассказав о локализованной ОС, экипаж автоматически освобождает себя от ответственности. Во-вторых, на практике расследование ОС не укладывается в рамки простых схематичных моделей. В этом процессе всегда есть место субъективизму, поэтому даже о явной ОС экипаж может рассказать не всю правду, стремясь обезопасить себя от обвинений, в то время как для устранения системных причин необходима полная и достоверная картина.

Санкции за создание предпосылок к авиационным происшествиям считаются (наряду с угрозой собственно авиационного происшествия) весьма сильным стимулом, заставляющим экипаж прилагать больше усилий к недопущению операторских ошибок. Именно с этой стимулирующей функцией и вступает в противоречие предложение о декриминализации расследования причин ОС. Рациональное принятие решений в столь ответственной сфере требует научного обоснования, в том числе с позиций теории управления социально-экономическими системами. Авторы данной работы предприняли попытку такого анали-

за с привлечением математического моделирования и полагают, что разработанный методический подход, а также общие качественные выводы и рекомендации окажутся полезными не только для гражданской авиации, но и для многих других отраслей, характеризующихся повышенной опасностью и высокой степенью ответственности операторов.

2. Математическая модель управления уровнем безопасности полетов в части определения ответственности за создание предпосылок к авиационным происшествиям

2.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ УСИЛИЙ ОПЕРАТОРОВ, НАПРАВЛЕННЫХ НА НЕДОПУЩЕНИЕ ОШИБОК

Формализуем описанную проблему следующим образом. Обозначим интенсивность суммарного потока предпосылок к авиационным происшествиям λ_{Σ} событий на летный час эксплуатации ВС. Этот поток складывается из двух составляющих: потока предпосылок, вызванных ошибками операторов, и потока предпосылок, вызванного прочими причинами – КПН, внешними факторами, системными проблемами в сфере безопасности полетов и т.п. Их интенсивности обозначим соответственно $\lambda_{\text{ош}}$ и $\lambda_{\text{пр}}$. Таким образом,

$$(1) \quad \lambda_{\Sigma} = \lambda_{\text{ош}} + \lambda_{\text{пр}}.$$

Оба слагаемых этой суммы зависят от некоторых факторов. Так, интенсивность ошибок операторов зависит прежде всего от уровня их усилий, направленных на недопущение ошибок. Обозначим его x . Тогда $\partial \lambda_{\text{ош}} / \partial x < 0$. Характерный вид зависимости приведен на рис. 1.

Он отражает основные качественные особенности рассматриваемого явления. Во-первых, предельная эффективность усилий сокращается: $\partial^2 \lambda_{\text{ош}} / \partial x^2 > 0$, а во-вторых, даже при неограниченном возрастании уровня усилий ошибки не исключаются – существует «неснижаемый остаток»

$$\lambda_{\text{ош}}^{\min} = \lim_{x \rightarrow \infty} \lambda_{\text{ош}}(x),$$

определяемый технологическими, психофизиологическими, эргономическими и др. факторами.

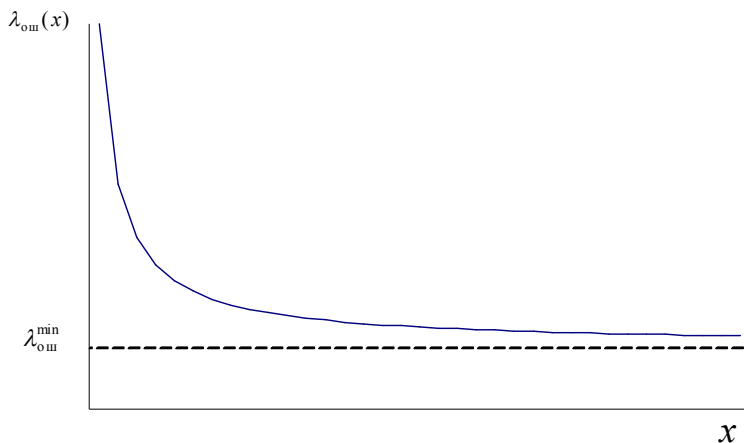


Рис. 1. Характерный вид зависимости $\lambda_{\text{ош}}(x)$

Что касается интенсивности предпосылок к происшествиям, вызванных прочими причинами, она, прежде всего, зависит от накопленного опыта расследования АП и ОС, ставших достоянием гласности. Этот опыт (измеряемый в количестве проанализированных АП и ОС) обозначим Q . Зависимость $\lambda_{\text{пр}}(Q)$ обладает теми же качественными свойствами, что и зависимость $\lambda_{\text{ош}}(x)$. В частности, также существует «неснижаемый остаток» $\lambda_{\text{пр}}^{\min} = \lim_{Q \rightarrow \infty} \lambda_{\text{пр}}(Q)$.

Далее учтем, что предпосылки к авиационным происшествиям могут иметь различные исходы: авиационные происшествия, явные особые ситуации, особые ситуации, локализованные на уровне экипажа и скрытые предпосылки к авиационным происшествиям¹. Пусть с вероятностью $p_{\text{АП}}$ предпосылки действи-

¹ Множества этих исходов рассматриваются как непересекающиеся и составляющие в совокупности полное множество возможных исходов.

тельно приводят к АП. Как правило, гораздо выше вероятность возникновения ОС, причем с вероятностью $p_{\text{явн}}$ она будет явной, а с вероятностью $p_{\text{лок}}$ – локализованной на уровне экипажа. Наконец, с вероятностью $p_{\text{скр}} = 1 - p_{\text{АП}} - p_{\text{явн}} - p_{\text{лок}}$ предпосылка к авиационному происшествию будет носить скрытый, латентный характер и останется незамеченной даже экипажем. Для простоты будем считать эти вероятности неизменными, хотя в реальности они могут зависеть от интенсивностей потоков предпосылок к АП, усилий экипажа по недопущению ошибок и уровня накопленного опыта, а также от прочих факторов.

Обозначим $d_{\text{АП}}$ субъективную оценку ущерба, который понесет экипаж в случае авиационного происшествия. Предположим для простоты, что он может быть выражен в тех же единицах, что и санкции за создание предпосылок к АП $d_{\text{штраф}}$. Также предположим, что в тех же единицах выражается и уровень усилий по недопущению предпосылок к происшествиям x . Следовательно, ожидаемый ущерб¹ экипажа, вызванный рисками попадания в АП и санкций после ОС, приведенный к летному часу, выражается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 (2) \quad \bar{D} &= \lambda_{\Sigma} \cdot \left(d_{\text{АП}} \cdot p_{\text{АП}} + d_{\text{штраф}} \cdot p_{\text{явн}} \cdot \frac{\lambda_{\text{ош}}}{\lambda_{\Sigma}} \right) = \\
 &= (\lambda_{\text{ош}} + \lambda_{\text{пр}}) \cdot \left(d_{\text{АП}} \cdot p_{\text{АП}} + d_{\text{штраф}} \cdot p_{\text{явн}} \cdot \frac{\lambda_{\text{ош}}}{\lambda_{\text{ош}} + \lambda_{\text{пр}}} \right) = \\
 &= d_{\text{АП}} \cdot p_{\text{АП}} \cdot (\lambda_{\text{ош}} + \lambda_{\text{пр}}) + d_{\text{штраф}} \cdot p_{\text{явн}} \cdot \lambda_{\text{ош}} .
 \end{aligned}$$

Множитель $\lambda_{\text{ош}}/\lambda_{\Sigma}$, равный доле предпосылок к авиационным происшествиям по вине экипажа, отражает предположение о справедливом расследовании причин каждой ОС, ставшей достоянием гласности. Подчеркнем, что лишь явные ОС будут основанием для наказания, а о локализованных ОС при $d_{\text{штраф}} > 0$ экипаж, вероятнее всего, не расскажет. Случай, когда

¹ Руководствуясь величиной ожидаемого ущерба, экипаж выступает как субъект, нейтральный к риску. На практике он может быть не расположен к риску, и угроза попадания в АП, например, может расцениваться как принципиально неприемлемая.

экипаж при наличии угрозы санкций добровольно расскажет о локализованных ОС, здесь не рассматривается как вырожденный – очевидно, что в этом случае ожидаемые потери только возрастут, а стратегическое мышление и сознательность (подчеркнем, при угрозе наказания, не способствующей их проявлению) здесь не рассматриваются.

В случае декриминализации расследования ОС (т.е. при $d_{\text{штраф}} = 0$) ожидаемый ущерб определяется только риском попадания в АП (что на практике само по себе является мощным стимулом):

$$(3) \quad \bar{D} = \lambda_{\Sigma} \cdot d_{\text{АП}} \cdot p_{\text{АП}} = d_{\text{АП}} \cdot p_{\text{АП}} \cdot (\lambda_{\text{ош}} + \lambda_{\text{пр}}).$$

Таким образом, при заданном уровне штрафа оптимальный уровень усилий экипажа, направленных на недопущение предпосылок к АП, определяется как результат решения следующей оптимизационной задачи (минимизируется сумма выраженных в одинаковых единицах усилий экипажа и ожидаемого ущерба):

$$(4) \quad \bar{D}(x) + x = d_{\text{АП}} \cdot p_{\text{АП}} \cdot [\lambda_{\text{ош}}(x) + \lambda_{\text{пр}}(Q)] + \\ + d_{\text{штраф}} \cdot p_{\text{явн}} \cdot \lambda_{\text{ош}}(x) + x \rightarrow \min_x;$$

$$(5) \quad \frac{\partial}{\partial x}(\bar{D} + x) = (d_{\text{АП}} \cdot p_{\text{АП}} + d_{\text{штраф}} \cdot p_{\text{явн}}) \cdot \frac{\partial \lambda_{\text{ош}}}{\partial x} + 1 = 0;$$

$$(6) \quad \Rightarrow -\frac{\partial \lambda_{\text{ош}}}{\partial x} \Big|_{x^*} = \frac{1}{d_{\text{АП}} \cdot p_{\text{АП}} + d_{\text{штраф}} \cdot p_{\text{явн}}}.$$

Графически можно определить этот уровень так, как показано на рис. 2.

Очевидно, что при наличии санкций за создание предпосылок к АП оптимальный уровень усилий будет, в общем случае, выше (или по крайней мере не ниже), чем в том случае, когда расследование ОС декриминализовано.

Заметим, что в данной упрощенной модели при неизменных вероятностях различных исходов предпосылок к АП, а также при аддитивной модели суммарного потока предпосылок, оптимальный уровень усилий x^* (а также соответствующая ему интенсивность потока предпосылок, возникающих по вине экипажа $\lambda_{\text{ош}}(x^*)$) вообще не зависит от объема накопленного опыта, от

времени с начала эксплуатации и т.п. Но если бы интенсивность ошибок экипажа зависела от интенсивности возникновения предпосылок к происшествиям по прочим причинам, такая зависимость уже проявилась бы.

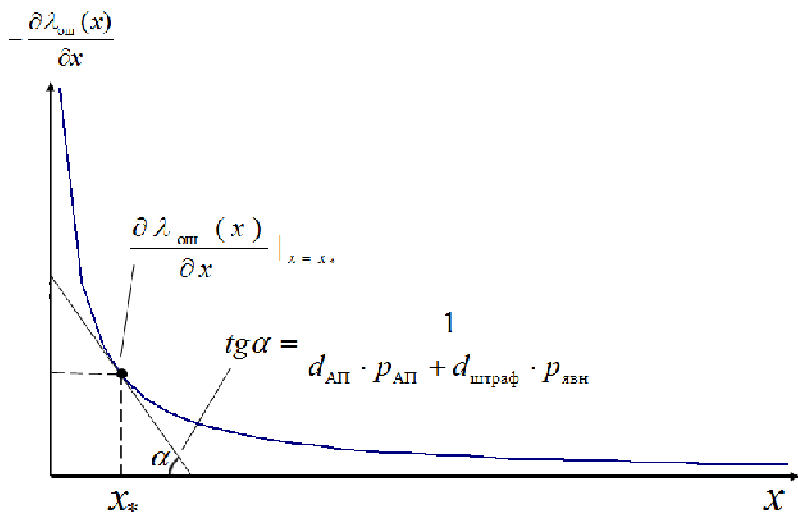


Рис. 2. Оптимальный уровень усилий экипажа, направленных на недопущение предпосылок к АП

2.2. ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ

Оценим скорость накопления опыта эксплуатации изделий данного типа, а также расследования происходящих с ними ОС и АП. Численность парка в периоде t (отсчитываемом с начала эксплуатации ВС данного типа: $t = 1, 2, \dots, T$) обозначим $N(t)$, а средний налет на одно ВС за период – $\eta(t)$. Строго говоря, в реальности и темпы наращивания численности парка, и темпы повышения налета до планового уровня зависят от количества и тяжести авиационных происшествий и особых ситуаций. Имиджевые потери авиастроительной компании после авиационных происшествий – вне зависимости от реальной вины разработчика и производителя – сказываются на продажах авиатехники, а приостановка эксплуатации, которая нередко практикуется даже

после особых ситуаций, не повлекших за собой тяжелых последствий, снижает величины налета ВС. То есть действуют обратные связи между численностью парка, его налетом и количеством АП и ОС. Однако в данной модели для простоты ими можно пренебречь.

Если пренебречь изменением модельных переменных на протяжении самого периода t , тогда суммарное количество АП и ОС, доступных для анализа, составит:

- при наличии санкций за создание предпосылок к АП (поскольку достоянием гласности станут лишь явные ОС):

$$(7) \quad q(t) = N(t) \cdot \eta(t) \cdot (p_{АП} + p_{явн}) \cdot \lambda_{\Sigma}(t);$$

- в случае декриминализации расследования ОС (поскольку достоянием гласности станут и локализованные ОС):

$$(8) \quad q(t) = N(t) \cdot \eta(t) \cdot (p_{АП} + p_{явн} + p_{лок}) \cdot \lambda_{\Sigma}(t).$$

В этих выражениях фигурирует суммарная интенсивность потоков предпосылок к авиационным происшествиям в периоде t :

$$(9) \quad \lambda_{\Sigma}(t) = \lambda_{\text{ош}} [x_*(t)] + \lambda_{\text{пр}} [Q(t)].$$

Она определяется накопленным к данному моменту опытом анализа АП и ОС $Q(t)$, а также характерным для данного периода уровнем усилий по предотвращению предпосылок $x_*(t)$. Подчеркнем, что он будет различным в зависимости от наличия либо отсутствия наказания за создание предпосылок к авиационным происшествиям.

Здесь предполагается, что вклад в накопление опыта вносят как отказы техники, проявления внешних сил и др. факторы, так и ошибки экипажа. В противном случае, если считать, что устранению КРН способствует лишь анализ АП и ОС, вызванных данными факторами, а не ошибками экипажа, вместо $\lambda_{\Sigma}(t)$ в вышеприведенных выражениях должна фигурировать лишь величина $\lambda_{\text{пр}}[Q(t)]$. С качественной точки зрения такое изменение предположений повлияет на результаты моделирования предсказуемым образом: введение санкций за ошибки экипажей в меньшей степени повлияет на скорость накопления опыта, чем в том случае, когда и ошибки экипажей вносили вклад в этот про-

цесс. Таким образом, прямое – дисциплинирующее – действие санкций станет более значимым.

Накопление опыта описывается следующим конечно-разностным соотношением:

$$(10) Q(t+1) = Q(t) + q(t), \quad t = 1, 2, \dots, T-1.$$

Целевой функцией регулятора (государства, авиационных властей, летной службы авиакомпании и т.п.) естественно считать ожидаемое суммарное количество авиационных происшествий за весь период эксплуатации парка изделий данного типа. Причем при неизменных вероятностях различных исходов предпосылок к АП минимизация этой суммы сводится к минимизации суммарного количества (накопленного потока) предпосылок к АП:

$$(11) J = \sum_{t=1}^T \lambda_{\Sigma}(t) \rightarrow \min.$$

Управляющими воздействиями регулятора могут быть

- величина штрафа за создание предпосылок к ОС $d_{\text{штраф}}$;
- сам факт наличия либо отсутствия штрафа.

Следует сразу прояснить ситуацию с определением оптимальной для регулятора величины штрафа $d_{\text{штраф}}$. Поскольку с ростом ставки штрафа уровень усилий экипажей растет, а интенсивность ошибок сокращается, оптимальным для регулятора было бы назначить штраф как можно выше. На первый взгляд, оптимальна бесконечно большая ставка штрафа. Однако нарастание его ставки имеет естественные пределы – можно предположить, что субъективное восприятие наказания за ОС вряд ли превзойдет оценку ущерба при попадании в АП (хотя следует признать, что на практике такие ситуации встречались в разных отраслях). Таким образом, $d_{\text{штраф}} \leq d_{\text{АП}}$ и возможности снижения интенсивности ошибок экипажей за счет санкций ограничены: $\lambda_{\text{ош}} \geq \lambda_{\text{ош}}(x^* | d_{\text{штраф}} = d_{\text{АП}})$.

Можно задаться вопросом: в каких единицах измеряются величины ущерба при АП и санкций после особых ситуаций, возникших по вине экипажа, а также уровень усилий операторов? Считая размерности этих величин одинаковыми, мы сво-

дим все к стоимостным единицам. И если в отношении санкций такой подход может быть правомерным, хотя, например, потери работника в случае увольнения или понижения в должности не ограничиваются лишь денежными потерями, тем более не сводятся к ним потеря здоровья или даже жизни в результате АП. Затруднительна и практическая оценка уровня усилий оператора в стоимостных единицах. Однако в данной модели все эти величины вводились лишь для того, чтобы показать, что интенсивность возникновения предпосылок к АП по вине экипажа снижается при наличии санкций, а операторы прилагают большие усилия для предотвращения таких предпосылок. Особо подчеркнем, что уровень интенсивности ошибок экипажей в данной упрощенной модели не зависит от времени, накопленного опыта и др. переменных – он зависит исключительно от наличия или отсутствия санкций в данный момент. Поэтому, в конечном счете, можно ограничиться в дальнейших расчетах лишь значениями интенсивности ошибок экипажей при отсутствии и при наличии санкций, обозначив их, соответственно, $\lambda_{\text{ош}}^0$ и $\lambda_{\text{ош}}^{\text{штраф}} < \lambda_{\text{ош}}^0$. Заметим, что их значения можно оценить на практике с большей достоверностью, чем значения величин, используемых в модели определения оптимального уровня усилий и $\lambda_{\text{ош}}(x^* | d_{\text{штраф}})$. Однако эта модель была необходима, в том числе, и для анализа рациональной политики регулятора в отношении величины штрафа. Именно в результате этого анализа было показано, что оптимальный уровень санкций (а, следовательно, и достигаемое благодаря им снижение интенсивности ошибок операторов) не зависит от времени и др. фазовых переменных модели, что и позволяет свести модель поведения операторов к двум величинам $\lambda_{\text{ош}}^0$ и $\lambda_{\text{ош}}^{\text{штраф}}$.

2.3. НЕПРЕРЫВНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ

Описанная выше модель далее будет использоваться для численных расчетов, но, наряду с ними, интерес представляет и качественный анализ зависимости оптимального решения от модельных параметров, который удобнее проводить аналитически, рассматривая модель в общем виде. Для этого перейдем к

непрерывному времени, и закон накопления опыта примет следующий вид:

$$(12) \dot{Q}(t) = q(t), \text{ или } Q(t) = \int_{\tau=0}^t q(\tau) d\tau, \quad t = [0; T].$$

Таким образом, целевая функция может быть выражена через управляющую переменную t' :

$$(13) J(t') = \int_{t=1}^{t'} \lambda_{\Sigma}^0(t) dt + \int_{t=t'}^T \lambda_{\Sigma}^{\text{штраф}}(t | t') dt,$$

где $\lambda_{\Sigma}^0(t)$, $t \in [0; t']$, и $\lambda_{\Sigma}^{\text{штраф}}(t | t')$, $t \in (t'; T]$ – сложившиеся к моменту t интенсивности возникновения предпосылок к авиационным происшествиям при отсутствии санкций с начала жизненного цикла изделия и при наличии санкций с момента t' соответственно. Значение этого параметра необходимо указывать, поскольку интенсивность возникновения предпосылок зависит от предыстории накопления опыта анализа АП и ОС Q , который в отсутствие санкций накапливается быстрее. В свою очередь, интенсивности возникновения предпосылок к АП можно выразить следующим образом:

$$(14) \lambda_{\Sigma}^0(t) = \lambda_{\text{ош}}^0 + \lambda_{\text{пр}} [Q^0(t)];$$

$$(15) \lambda_{\Sigma}^{\text{штраф}}(t | t') = \lambda_{\text{ош}}^{\text{штраф}} + \lambda_{\text{пр}} [Q^{\text{штраф}}(t | t')],$$

где

$$(16) Q^0(t) = \int_{\tau=0}^t N(\tau) \cdot \eta(\tau) \cdot (p_{\text{АП}} + p_{\text{явн}} + p_{\text{лок}}) \cdot \lambda_{\Sigma}^0(\tau) d\tau$$

$$t \in [0; t'];$$

$$(17) Q^{\text{штраф}}(t | t') = Q^0(t) +$$

$$+ \int_{\tau=0}^t N(\tau) \cdot \eta(\tau) \cdot (p_{\text{АП}} + p_{\text{явн}}) \cdot \lambda_{\Sigma}^{\text{штраф}}(\tau) d\tau, \quad t \in (t'; T]$$

– объемы накопленного к моменту t опыта анализа АП и ОС при отсутствии санкций с начала жизненного цикла и при наличии санкций с момента t' соответственно.

Таким образом, в общем виде динамика фазовых переменных модели описывается интегро-дифференциальными уравнениями. Аналитическое исследование их решений затруднено и в данной работе не приводится.

3. Анализ оптимальных стратегий управления безопасностью полетов

Поскольку по мере накопления опыта расследования АП и ОС интенсивность возникновения предпосылок к авиационным происшествиям по причинам, связанным с конструктивно-производственными недостатками и т.п., снижается и приближается к $\lambda_{\text{пр}}^{\min}$, с некоторого момента накопление опыта уже не будет столь значимо влиять на повышение безопасности полетов. И если в начальный период могло быть целесообразным освободить экипажи от ответственности за создание предпосылок к АП, рассчитывая на их откровенность и ускоряя накопление опыта, то с определенного момента большую значимость приобретет повышение дисциплины эксплуатации авиатехники (тем более что удельный вес ошибок экипажа в общем потоке предпосылок к авиационным происшествиям возрастает по мере устранения КППН и др. причин). В связи с этим, оптимальное управление безопасностью полетов (в части рассматриваемых здесь проблем) имеет кусочно-постоянный вид¹: до определенного момента «переключения» t' анализ любых ОС декриминализован, а начиная с этого момента, вводятся санкции (допустим, на максимально возможном уровне $d_{\text{штраф}} = d_{\text{АП}}$) в тех случаях, когда экипаж будет признан виновным в создании ОС. Таким образом, задача сводится к поиску оптимального момента «переключения» $t_{\text{опт}}'$.

Если задаться конкретным видом функций $\lambda_{\text{пр}}(Q)$ и $\lambda_{\text{ош}}(x)$, а также исходными значениями всех параметров модели, можно провести численное компьютерное моделирование, вычислив для заданного момента t' значение целевой функции, а затем

¹ Строгого доказательства именно такой структуры оптимальной траектории в данной работе не приводится.

найти оптимальный момент «переключения» подбором (путем последовательного перебора, начиная с $t' = 1$, либо каким-то более совершенным методом поиска). Такое моделирование было проведено авторами с применением программного комплекса *Wolfram Mathematica*, и далее будут приведены некоторые его результаты.

Рассмотрим следующий количественный пример. Предположим, что закон обучения имеет логарифмический вид, принятый в большинстве моделей этого явления:

$$(18) \lambda_{\text{КПН}}(t) = \lambda_{\text{КПН}}^0 \cdot (1 - \tau_{\text{обуч}})^{\log_2 Q(t-1)},$$

$$(19) \lambda_{\text{ош}}(t) = \begin{cases} \lambda_{\text{ош}}^0, & t < t' \\ \lambda_{\text{ош}}^{\text{штр}}, & t \geq t' \end{cases},$$

где t' – год введения штрафа.

$$(20) Q(t) = Q(t-1) + q(t) \text{ объем накопленного опыта к году } t,$$

$$(21) q(t) = \begin{cases} (p_{\text{АП}} + p_{\text{явн}} + p_{\text{лок}}) \cdot (\lambda_{\text{КПН}}(t) + \lambda_{\text{ош}}(t)) \cdot \eta(t) \cdot N(t), & t < t' \\ (p_{\text{АП}} + p_{\text{явн}}) \cdot (\lambda_{\text{КПН}}(t) + \lambda_{\text{ош}}(t)) \cdot \eta(t) \cdot N(t), & t \geq t' \end{cases},$$

общий налет:

$$(22) \eta(t) = \eta(t-1) + (\eta^{\text{max}} - \eta(t-1)) \cdot \tau_{\text{нал}},$$

численность парка ВС:

$$(23) N(t) = N(t-1) \cdot (1 + \tau_{\text{числ}}).$$

Пусть вероятность явной ОС $P_{\text{явн}} = 0,1$; вероятность локализованной ОС $P_{\text{явн}} = 0,1$; исходная интенсивность возникновения предпосылок к ОС из-за КПН $\lambda_{\text{КПН}}^0 = 0,01$; темп обучения $\tau_{\text{обуч}} = 0,2$; темп роста налета ВС $\tau_{\text{нал}} = 0,2$; темп роста численности ВС $\tau_{\text{числ}} = 0,1$; интенсивность возникновения предпосылок к ОС из-за ошибок при отсутствии штрафов $\lambda_{\text{ош}}^0 = 0,001$; при наличии штрафов – $\lambda_{\text{ош}}^{\text{штр}} = 0,0005$; начальная численность парка ВС $N^0 = 50$; начальный налет $\eta^0 = 1000$; $\eta^{\text{max}} = 365 \cdot 24 = 8760$ л.ч./г (даже если не учитывать неизбежных простоев на техобслуживание и ремонт, погрузку-разгрузку ВС и т.п.).

Далее приведены графики зависимости (от длительности моратория на наказание операторов за возникновение предпо-

сылки к АП) суммарного количества предпосылок к АП за плановый период $J(t')$ при изменении различных параметров. Прежде всего, рассмотрим изменение целевой функции при изменении вероятности АП $P_{АП}$ от 0 до 0,7, см. рис. 3. Здесь и далее жирной сплошной линией соединены минимумы функции $J(t')$ при различных значениях параметра $P_{АП}$.

Из графиков видно, что по мере повышения вероятности АП оптимальный момент «переключения» смещается на более ранние сроки, т.е. становится более важным с самых ранних этапов минимизировать (за счет повышения дисциплины операторов) поток предпосылок к ОС, которые могут превратиться в АП, нежели накопить опыт устранения этих предпосылок.

Далее сохранены исходные данные предыдущего примера, причем параметр $P_{АП}$ (который в предыдущем примере менялся) принят равным 0,02, а параметр $P_{лок}$ варьируется от 0 до 0,5, см. рис. 4.

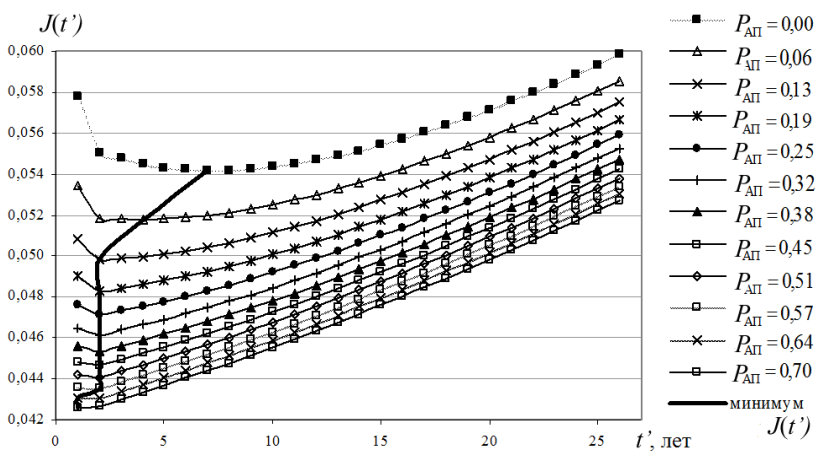


Рис. 3. Зависимости суммарного количества предпосылок к АП $J(t')$ от длительности моратория на наказание операторов для разных вероятностей АП

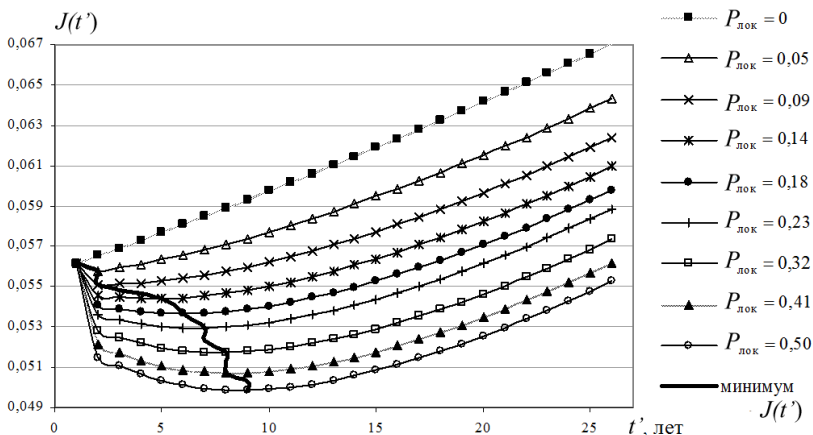


Рис. 4. Зависимости суммарного количества предпосылок к АП $J(t')$ от длительности моратория на наказание операторов для разных вероятностей локализованных ОС

Как видно из графиков, по мере повышения доли локализованных ОС целесообразно все позже вводить наказание для операторов. Напротив, при отсутствии или малой доле таких ОС нет смысла в раскрытии их причин, и наказание целесообразно вводить практически с начала периода эксплуатации.

Далее сохранены исходные данные предыдущего примера, причем параметр $P_{лок}$ (который в предыдущем примере менялся) принят равным 0,2, а параметр $P_{явн}$ варьируется от 0 до 0,6, см. рис. 5.

Итак, при увеличении как вероятности авиационного происшествия, так и вероятности явной ОС, оптимальное время введения штрафа уменьшается, в отличие от увеличения вероятности локализованной ОС, когда оптимальное время введения штрафа увеличивается.

Далее сохранены исходные данные предыдущего примера, причем параметр $P_{явн}$ (который в предыдущем примере менялся) принят равным 0,1, а параметр $\lambda_{ош}^{штр}$ варьируется от $5,0 \cdot 10^{-5}$ до $15,0 \cdot 10^{-5}$, см. рис. 6.

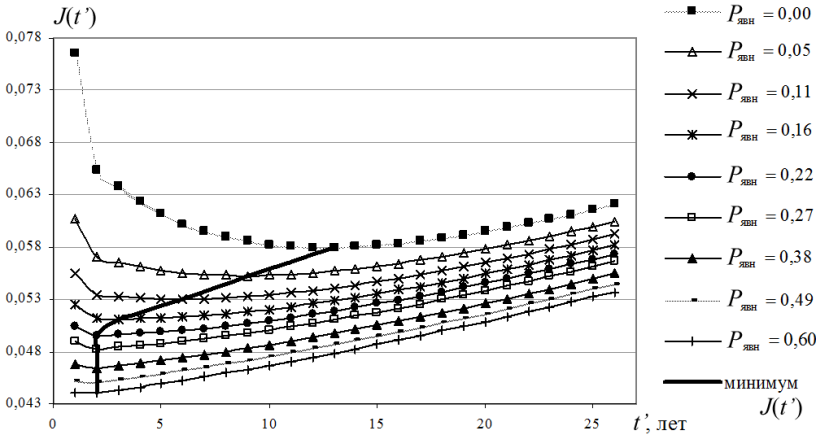


Рис. 5. Зависимости суммарного количества предпосылок к АП $J(t')$ от длительности моратория на наказание операторов для разных вероятностей явных ОС

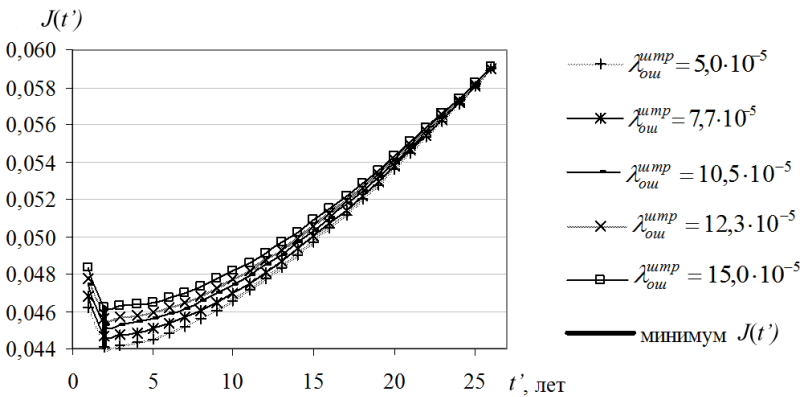


Рис. 6. Зависимости суммарного количества предпосылок к АП $J(t')$ от длительности моратория на наказание операторов для разных интенсивностей потоков предпосылок, вызванных ошибками операторов

Как видно из графиков, в данном примере зависимость оптимального момента «переключения» от $\lambda_{\text{ош}}^{\text{штр}}$ отсутствует. Да-

лее сохранены исходные данные предыдущего примера, причем параметр $\lambda_{\text{ош}}^{\text{штр}}$ (который в предыдущем примере менялся) принят равным 0,0005, а параметр $\tau_{\text{обуч}}$ варьируется от 0 до 0,5, см. рис. 7.

При изменении темпа обучения оптимальный момент введения штрафа меняется немонотонно по следующим причинам. При малых темпах обучения эффект декриминализации расследования ОС будет слабым, и большой эффект принесет повышение дисциплины операторов с самого начала периода эксплуатации. Однако, если темп обучения высок, накопление опыта происходит быстро, и большая часть соответствующего эффекта достигается уже на ранних стадиях эксплуатации, после чего целесообразно усиливать дисциплину операторов.

Далее сохранены исходные данные предыдущего примера, причем параметр $\tau_{\text{обуч}}$ (который в предыдущем примере менялся) принят равным 0,2, а параметр $\lambda_{\text{КПН}}^0$ варьируется от 0,001 до 0,101, см. рис. 8.

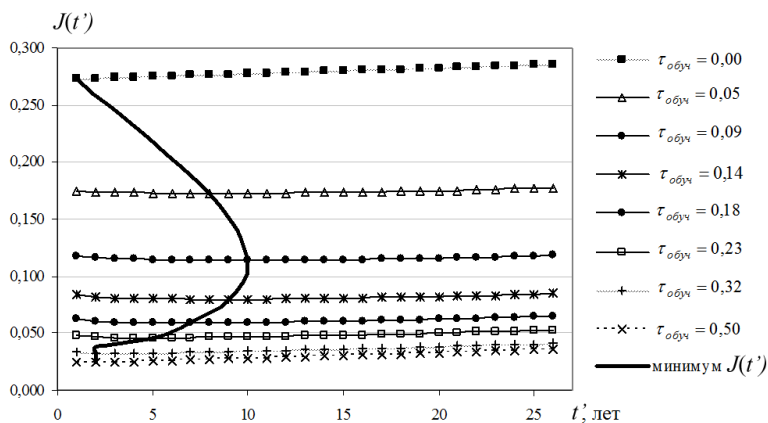


Рис. 7. Зависимости суммарного количества предпосылок к АП $J(t')$ от длительности моратория на наказание операторов для различных уровней темпа обучения

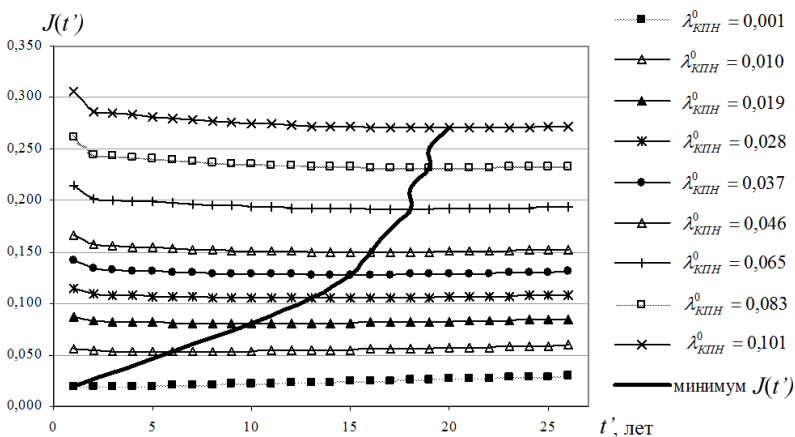


Рис. 8. Зависимости суммарного количества предпосылок к АП $J(t')$ от длительности моратория на наказание операторов для различных начальных интенсивностей потоков предпосылок к АП из-за КПН

С увеличением начальной интенсивности потока предпосылок к АП из-за КПН время оптимального введения штрафа увеличивается монотонно, поскольку растет значимость КПН по сравнению с ошибками операторов, и более значимо накопление опыта устранения КПН, нежели усиление дисциплины операторов.

Что касается прочих параметров, то от темпов роста годового налета, так же как от потолка налета, оптимальный момент переключения в проведенных численных расчетах не зависит. С увеличением же темпа роста численности, первоначальной численности и первоначального налета оптимальный момент переключения уменьшается, поскольку во всех этих случаях опыт устранения КПН накапливается быстрее и раньше появляется целесообразность усиления дисциплины операторов.

4. Выводы

Анализ предложенной математической модели показал, что в начале периода эксплуатации новой технической системы це-

лесообразно смягчить ответственность операторов за возникновение нештатных ситуаций, во избежание утаивания ими важной информации, которая может быть использована для совершенствования системы. Ужесточение ответственности за ошибки операторов целесообразно, когда подобные возможности будут близки к исчерпанию, либо когда они изначально незначительны. Оптимальная длительность периода освобождения операторов от ответственности (декриминализации расследования нештатных ситуаций) тем выше, чем меньше

- вероятность авиапроисшествия;
- доля явных особых ситуаций;
- темп роста численности парка;
- первоначальная численность парка и первоначальный налет;

и выше при увеличении

- вероятности локализованных особых ситуаций;
- начальной интенсивности потока предпосылок к авиапроисшествиям из-за конструктивно-производственных недостатков.

Зависимость оптимальной длительности освобождения операторов от ответственности от темпа обучения немонотонна: при очень малых и очень высоких темпах обучения оптимальная длительность периода декриминализации сокращается.

Литература

1. КЛЮЧКОВ В.В., ВАРЮХИНА Е.В. *Экономические аспекты определения ответственности производителей за отказы техники* // Вестник УГТУ-УПИ. – 2010. – №2. – С. 141–151.
2. ПАВЛЕНКО А. *Криминализация расследований авиационных событий* // Деловой авиационный портал АТО.ru. Материалы АЭВТ. 24.02.2012. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ato.ru/content/kriminalizaciya-rassledovaniy-aviacionnyh-sobytiy> (дата обращения: 25.05.2012).

3. *Человеческий фактор* // Сборник материалов №1. Фундаментальные концепции человеческого фактора. – Циркуляр ICAO 216-AN/131, ICAO, Монреаль, 1989. – 34 с.
4. ALCHIAN A. *Reliability of Progress Curves in Airframe Production* // *Econometrica*. – 1963. – Vol. 31. – №4. – P. 679–694.
5. WRIGHT T.P. *Factors Affecting the Cost of Airplanes* // *Journal of Aeronautical Sciences*. – 1936. – №3. – P. 122–128.

INFLUENCE OF PERSONNEL RESPONSIBILITY FOR ACCIDENTS PRECONDITIONS EMERGENCE ON FLIGHT SAFETY

Ekaterina Varyukhina, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, postgraduate student (*eyebrow@yandex.ru*).

Vladislav Klochkov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, leading research fellow (*vlad_klochkov@mail.ru*).

Abstract: A considerable number of accidents and crashes in the world are caused by human factor. Consequently, the most obvious decision to reduce accident rate is to enlarge the staff responsibility for making preconditions for accidents. Nevertheless, we provide the economic-mathematical analysis to justify extenuating the responsibility of the staff for the emergency appearance in the beginning of the operation period for them to report important information, which can be used to improve the system.

Keywords: revelation of accidents preconditions, personnel responsibility, flight safety, learning curve, economic-mathematical modeling, aircraft

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Р. М. Нижегородцевым