Математическое моделирование повышения уровня безопасности в случае отказов авиационной и космической техники

Б. Ф. Мельников, Е. В. Давыдова

***Аннотация*—По мере усложнения космических программ полёта всё более актуальными становятся вопросы обеспечения безопасности экипажа. В связи с крайне высокой стоимостью создания и эксплуатации пилотируемых космических кораблей, ценой потерь при авариях и отказах авиационной и ракетно-космической техники, а также в связи со значительной стоимостью проектирования перспективных пилотируемых кораблей нового поколения, необходим новый подход к обеспечению безопасности людей на стартовом комплексе. Для этих целей мы предлагаем использовать разработанную нами математическую модель повышения уровня безопасности при возникновении аварийной ситуации.**

В статье мы предлагаем новый подход к постановке оптимизационных задач, предназначенных для моделирования аварийных ситуаций. Этот подход может быть кратко описан следующим образом. Имеются некоторые состояния, в которых может находиться моделируемая техника, причём для состояний мы также рассматриваем конечные последовательности их переключений. Примеры таких переключений – запуск ракеты, отмена пуска, команда на предварительную ступень тяги и т. д., а каждое переключение – это переход из одного состояния в другое. При этом существует вероятность, что некоторое переключение приведёт к аварии, все такие вероятности мы считаем заданными.

Коэффициенты матриц представляют собой логарифмы вероятностей того, что переключение между парами состояний не приведёт к аварии. При этом каждая последовательность состояний – т. е. некоторая последовательность переключений – даёт логарифм общей вероятности отсутствия аварии. Рассматриваемая нами модель использует широко известную задачу дискретной оптимизации – а именно, задачу коммивояжёра. Мы стремимся добиться того, чтобы вероятность отсутствия аварии, соответствующая некоторой последовательности переключений, была бы минимальной. Поскольку задача коммивояжёра является трудноразрешаемой, мы обычно удовлетворяемся нахождением некоторого псевдооптимального решения – которое, как мы полагаем, соответствует последовательности переключений, приемлемо близкой к оптимальной.

***Ключевые слова*—чрезвычайная ситуация, математическая модель, нечёткая логика, задаче дискретной оптимизации, задача коммивояжёра.**

I. Введение

По мере усложнения авиационной техники и космических программ полёта всё более актуальными становятся вопросы обеспечения безопасности экипажа. При этом крайне высокими являются не только стоимость создания и эксплуатации авиационной техники, пилотируемых космических кораблей, а также цена потерь при авариях и отказах авиационной и ракетно-космической техники, но и (конечно, в меньшей степени) *стоимость проектирования* перспективных авиационных и космических кораблей нового поколения. Поэтому необходим новый подход к обеспечению безопасности людей на стартовом комплексе. Мы для этих целей предлагаем использовать разработанную нами математическую модель повышения уровня безопасности при возникновении аварийной ситуации.

Практика реализации пилотируемых авиационных и космических полётов показывает, что проблема обеспечения безопасности экипажей кораблей по мере усложнения программ полёта становится всё более актуальной и трудно реализуемой, см. [1]. Например, обеспечение повышения уровня безопасности экипажа на орбитальной станции в настоящее время сопряжено с серьезными трудностями по следующим причинам:

- обобщения имеющегося опыта носят разрозненный характер;
- существующая нормативно-техническая база обеспечения безопасности существенно устарела;
- известные на сегодня разработки, связанные с математическим моделированием соответствующих объектов, затрагивают лишь отдельные стороны обеспечения безопасности, см. [2].

Поэтому необходимо разрабатывать новые модели, повышающие уровень безопасности.

Итак, очень актуальными являются задачи моделирования обеспечения уровня безопасности в случае отказов авиационной и космической техники. В настоящей статье предлагается подход к постановке оптимизационных задач, предназначенных для моделирования повышения подобного уровня безопасности и моделирования аварийных ситуаций. Кратко этот подход может быть описан следующим образом. Имеются некоторые состояния, в которых может находиться моделируемая техника, причём мы также рассматриваем *конечные последовательности* переключений этих состояний. Примеры переключений между состояниями в случае космической техники следующие:

- отработка отказа некоторого датчика;
- команда на предварительную ступень тяги;
- запуск ракеты;
- отмена пуска.

Статья получена 7 апреля 2018.

Борис Феликсович Мельников, Российский государственный социальный университет (email: bf-melnikov@yandex.ru).

Елизавета Владимировна Давыдова, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (email: elizaveta_2710@mail.ru).

Конечно, имеется много других состояний – в реальных моделируемых задачах, см. [3], [4], [5], их число измеряется несколькими десятками. Каждое переключение – это переход из одного состояния в другое. Среди этих абстрактных состояний выбрано одно, соответствующее исходному конкретному состоянию моделируемого комплекса.

Существует вероятность, что некоторое переключение приведёт к аварии, и все такие вероятности мы считаем заданными.

Коэффициенты матриц представляют собой *логарифмы вероятностей* того, что переключение между парами состояний *не приведёт* к аварии. При этом каждая последовательность состояний – т. е. некоторая последовательность переключений – даёт при суммировании *логарифм общей вероятности* отсутствия аварии. Рассматриваемая нами модель использует широко известную задачу дискретной оптимизации – а именно, задачу коммивояжёра. Мы стремимся добиться того, чтобы вероятность отсутствия аварии, соответствующая некоторой последовательности переключений, была бы минимальной.

Из изложенного выше можно заключить, что описываемая нами модель при совсем незначительных её изменениях может быть применена и во многих других предметных областях. Отметим также, что поскольку задача коммивояжёра является трудноребшаемой, см. [6], мы обычно удовлетворяемся нахождением некоторого *псевдооптимального* решения – которое, как мы полагаем, соответствует некоторой последовательности переключений, приемлемо близкой к последовательности оптимальной.

При этом очень важно отметить, что реальные рассматриваемые нами задачи часто нужно считать *задачами реального времени*: например, согласно уже процитированным нами монографиям [3], [4], вероятности отсутствия аварии между переключениями часто являются динамическими величинами, определяемыми в процессе работы системы.

II. Постановка задачи моделирования повышения уровня безопасности

Итак, мы рассматриваем математическую модель, демонстрирующую повышение технологической безопасности на стартовом комплексе. В приводимой в настоящей статье постановке рассматриваемую нами задачу можно считать *прямой задачей* математического моделирования – в отличие от близких моделей, рассматривавшихся в предыдущих статьях [1], [2], в которых рассматривались варианты *обратных* задач [1]. В настоящей статье мы в *заданной* модели, рассматривающей *все возможные последовательности* переключений между состояниями, ищем оптимальный вариант, – например, минимизирующий вероятность гибели экипажа на старте.

Для минимальной вероятности гибели экипажа на старте мы в этой статье, а также в статьях, предполагаемых для публикации в будущем, используем сокращение МВГЭ [2]. Эта величина является дополнительной величиной к вероятности обеспечения безопасности экипажа.

Итак, мы предполагаем, что произошла штатная подготовка и пуск, после чего по команде <Нештатное выведение> либо <Авария> произошло срабатывание системы аварийного спасения. Для того, чтобы сформировать директиву на выполнение последовательности переключений, мы полагаем, что заданы вероятности отсутствия аварии, соответствующие переключениям из i-го состояния в j-е. При этом:

- имеется одно заранее зафиксированное «нулевое» состояние, которое можно рассматривать как стартовое, либо – в более полной модели – одновременно как стартовое и финальное;
- все вероятности отсутствия аварии (т.е. вероятности, соответствующие всем упорядоченным парам (i, j), где $i, j \in \overline{0, n}$, $i \neq j$) – ненулевые [3];
- вследствие предыдущего определены натуральные логарифмы этих значений – т.е. все логарифмы вероятности отсутствия аварии, соответствующей некоторой упорядоченной паре (i, j) – и мы можем рассматривать минимальное значение такого логарифма; обозначим это значение $L_{\min}$.

После этих действий мы формируем матрицу A_{ij} (как и ранее, $i, j \in \overline{0, n}$), вычисляя значения A_{ij} следующим образом. Пусть $i \neq j$, а p_{ij} – вероятность отсутствия аварии при переходе из i-го состояния в j-е. Тогда полагаем

$$A_{ij} = \ln(p_{ij}) - L_{\min}\,.$$

При этом, рассматривая *некоторую произвольную* сумму

$$S(P) = A_{0m_1} + A_{m_1m_2} + \cdots + A_{m_{n-1}m_n} + A_{m_n0}\,,$$

соответствующую некоторой перестановке

$$M = (0, m_1, \ldots, m_n), \text{ где } \{m_1, \ldots, m_n\} = \{1, \ldots, n\}\,,$$

мы через введённые выше величины можем несложным образом выразить значение $S(P)$ – либо, что вычисляется практически так же, значение $\exp(S(P))$. При этом, обозначая $L = (L_{\min})^{n+1}$, мы получаем, что

$$\begin{gathered}\exp(S(P)) = \\ \exp(A_{0m_1} + A_{m_1m_2} + \cdots + A_{m_{n-1}m_n} + A_{m_n0}) = \\ \exp(A_{0m_1}) \cdot \exp(A_{m_1m_2}) \ldots \exp(A_{m_{n-1}m_n}) \cdot \exp(A_{m_n0}) \\ = (p_{0m_1} \cdot p_{m_1m_2} \ldots p_{m_{n-1}m_n} \cdot p_{m_n0}) \;\;/\;\; L\,.\end{gathered}$$

Как несложно видеть, это выражение определяет вероятность того, что *соответствующая последовательность переключений* между парами состояний *не приведёт* к аварии.

Итак, коэффициенты матриц, представляющие собой логарифмы вероятностей того, что переключение между парами состояний не приведёт к аварии, можно использовать в обычной формуле широко известной задачи дискретной оптимизации – задачи коммивояжёра (ЗКВ), [10], [11], [12] и мн. др. Как следует из вышеизложенного,

[1] Согласно [7], [8], в обратной задаче известно множество возможных моделей объекта, и в качестве задачи моделирования мы должны на основании дополнительных данных об объекте выбрать конкретную модель. Различными моделями в [1], [2] мы считали различные последовательности состояний. Здесь же, как уже было отмечено, мы используем иной подход.

[2] Эта аббревиатура, уже употреблявшаяся одним из авторов в [9], похожа на другую употребляемую нами, МВГ (метод ветвей и границ). Мы надеемся, что это сходство не вызовет проблем.

[3] Специально отметим, что мы *допускаем* возможности $i = 0$ и $j = 0$.

каждая последовательность состояний – т. е. некоторая последовательность переключений – даёт логарифм общей вероятности отсутствия аварии. Рассматриваемая нами модель использует задачу коммивояжёра, и решая её конкретный вариант [4], *мы стремимся добиться того, чтобы вероятность отсутствия аварии, соответствующей некоторой последовательности переключений, была бы минимальной.*

При этом очень важно отметить, что реальные рассматриваемые нами задачи часто нужно считать *задачами реального времени*: например, согласно [3], [4], вероятности отсутствия аварии для некоторого переключения пар состояний (и, следовательно, вся рассматриваемая матрица A_{ij}, $i, j \in \overline{0,n}$) строится *динамически*, т.е. может зависеть от конкретной ситуации. В связи с этим для решения поставленной задачи мы должны применять методы решения, предназначенные для разработки т.н. anytime-алгоритмов [5], – что мы и делаем при описании алгоритмов в оставшейся части статьи.

III. Метод ветвей и границ и некоторые вспомогательные эвристики

Итак, в рассматриваемой нами модели мы решаем классическую задача коммивояжёра. Кроме вышеупомянутых монографий, посвящённых этой задаче, – [10], [11], [12], отметим ещё и [14]. Вообще, задаче коммивояжёра на протяжении последних десятилетий было посвящено очень много публикаций, но, конечно, проблемы остаются: какого-либо <универсального> метода решения ЗКВ просто не может существовать. В последние несколько лет авторы работ по эвристическим методам решения ЗКВ чаще других рассматривают так называемые симметричные ЗКВ – т.е. когда матрица стоимостей является симметричной относительно главной диагонали – и особенно их частные случаи, т.н. метрические ЗКВ; понятно, что для нашего случая такие постановки задач не подходят.

Для их решения чаще всего применяются либо различные модификации методов мультиагентной оптимизации – см. [15], [16] и мн.др., – либо фактическое све́дение работы с матрицей ЗКВ к работе *с координатами* точек («городов») – см. [17], [18], [19] и др. Однако, по мнению авторов настоящей статьи, подтверждённом кратко описываемыми далее вычислительными экспериментами, в рассматриваемой задаче с успехом может применяться классический МВГ – причём применяться для получения не только точного решения ЗКВ, но и различных приближённых, полученных эвристическими алгоритмами, в том числе уже упомянутыми anytime-алгоритмами. При этом иногда используется све́дение задачи к работе с координатами «городов» – аналогично применявшемуся нами в [19]. Отметим ещё, что нами рассматриваются модификации МВГ, *не* использующие т.н. 1-деревья [21], представляющие собой альтернативу эвристическому выбору очередного шага МВГ.

Далее мы будем рассматривать т.н. мультиэвристический подход к решению задач дискретной оптимизации, МЭП – см. [13]. Можно сказать, немного упрощая ситуацию, что основной предмет настоящей статьи заключался в том, что при добавлении к эвристикам, описывающим МВГ [6], некоторых *вспомогательных* эвристик получаемые алгоритмы (названные нами, как уже было отмечено выше, мультиэвристическим подходом к задачам дискретной оптимизации, МЭП) дают существенно больший временной выигрыш, чем применение эвристик по отдельности: про конкретные варианты применения *описанного нами* МЭП в различных оптимизационных задачах, реализованные как до, так и после выхода статьи [13], см. в [12], [19], [20], [23], [24], [25], [26], [27] и мн.др.

Конкретно в задаче, рассматриваемой нами, мы применяли следующие эвристики:

- локальный поиск (подробнее см. в [12] – мы в настоящей работе применяли аналогичные алгоритмы);
- применение в задачах дискретной оптимизации функций риска и выбора разделяющего элемента на их основе (немного про эту эвристику было в [28], [27], [29] – однако подробную статью на эту тему мы предполагаем опубликовать в будущем);
- кластеризация ситуаций (кратко об этой эвристике, а точнее о классе эвристик, см. в [30] – а подробнее на эту тему мы также предполагаем публикацию о дальнейших выполненных в этом направлении работах).

Отметим ещё раз, что эти три эвристики являются «добавкой» к МВГ, и, кроме того, наиболее успешные результаты в рассматриваемой нами задаче получаются при применении их всех *в комплексе* – подробнее см. далее, при описании вычислительных экспериментов.

[4] Термин «вариант проблемы» мы используем согласно [6].

[5] В подобном написании этот термин употребляется в русских публикациях по крайней мере с середины 1990-х годов. Как было отмечено в [13], аналогичного краткого русского термина, к сожалению, не существует: название <алгоритмы реального времени> недостаточное (оно не полностью отражает суть), а <постепенно приближающие псевдооптимальные алгоритмы реального времени> весьма громоздко.

Итак, anytime-алгоритм – это алгоритм реального времени, который в каждый определённый момент работы имеет лучшее (на данный момент) решение. При этом пользователь может в режиме реального времени просматривать получающиеся *псевдо-оптимальные решения*, а последовательность таких решений в пределе даёт оптимальное решение.

[6] Согласно одному из определений, приведённых в монографии [22], МВГ действительно является эвристическим алгоритмом; мы процитируем здесь текст из [22] – в переводе, изданном под редакцией одного из авторов настоящей статьи.

Сам термин «эвристика» определён неоднозначно (в частности, для задач комбинаторной оптимизации) – т.е. используется в разных значениях.

В общем смысле эвристические алгоритмы являются непротиворечивыми алгоритмами решения оптимизационных задач. Они основаны на какой-нибудь ясной (но при этом обычно достаточно простой) идее – стратегии поиска в множестве всех допустимых решений; однако обычно такая стратегия не гарантирует, что какое-нибудь оптимальное решение найдётся. В этом смысле иногда говорят об эвристике локального поиска или жадной эвристике – даже если метод приводит только к аппроксимационному алгоритму.

А в узком смысле эвристика является методом получения непротиворечивого алгоритма, который для типичных частных случаев (входов) рассматриваемых оптимизационных проблем даёт допустимые решения приемлемого качества за приемлемое (например, полиномиальное) время. Однако при этом не существует – или мы не знаем – строгого доказательства того, что алгоритм ведёт себя именно подобным образом; цель эвристики – «пообещать» хорошее поведение алгоритма для типичных входов рассматриваемой оптимизационной задачи.

Как можно видеть, метод ветвей и границ подходит под *оба* приведённых определения эвристики.

IV. Вычислительные эксперименты: описание и результаты

Описываемые далее вычислительные эксперименты были проведены с ограниченным количеством данных. А именно, в качестве *исходной* (можно сказать – «основной исходной») мы взяли матрицу размерности 35, созданную на основе данных, *согласованных с [3]*. А для размерности 25 и нескольких вариантов бо́льших размерностей (от 45, 55 и 65) мы формировали *исходные матрицы этих размерностей* таким образом, чтобы были выполнены определённые нами специальные критерии репрезентативности,[7]. После этого мы для каждой рассматриваемой размерности мы на основе исходных матриц сформировали по 1000 различных матриц, полученных из исходной таким же образом, как в [13], [19] и др. мы формировали псевдогеометрический вариант ЗКВ (подробнее о нём см. ниже). При этом мы также дополнительно проверяли, чтобы изменённые данные могли представлять собой матрицу вероятностей отсутствия аварий (точнее – матрицу A_{ij}, удовлетворяющую изложенной выше постановке задачи коммивояжёра, полученную с помощью описанных выше преобразований вероятностей) – и в случае отрицательного результата проверки «забраковывали» сгенерированную матрицу. Число «забраковывавнных» матриц оказывалось приемлемым, т.е. эти матрицы не препятствовали формированию БД для дальнейших исследований эффективности алгоритмов.

Отметим также, что мы при этом получаем следующую *вспомогательную* вычислительную задачу, исследовать которую мы собираемся в будущем. А именно – необходима *проверка репрезентативности* полученных таким образом данных. В настоящей статье мы также не будем описывать сами возможные критерии репрезентативности, отметим лишь, что они имеют аналогию с применявшимися нами в другой задаче дискретной оптимизации, см. [20]. Более того, подобная проверка может быть осуществлена методами, близкими к описанным также в той же самой статье [20].

Итак, опишем кратко само формирование *псевдогеометрической* версии ЗКВ – на основе т.н. геометрической версии, см. [13], [23], [25] и др. Входные данные формируются следующим образом. К данным некоторой *заранее заданной* ЗКВ[8] добавляется вектор

$$R = (r_1, \dots, r_m), \qquad (\text{где} \quad m = |E|).$$

При этом все r_i суть независимо одинаково распределённые случайные величины, и мы рассматриваем нормальное распределение с $\mu = 1$ и некоторым заранее заданным («приемлемым») значением σ. При этом каждый из элементов матрицы стоимостей ($c(\{u, v\})$; пусть это c_i для некоторого $i \in \{1, \dots, m\}$) заменяется на следующее значение:

$$\max(c_i \cdot r_i, 0).$$

Отметим ещё, что «в обычном случае» геометрический вариант ЗКВ можно по определению считать частным случаем псевдогеометрического со значением $\sigma = 0$.

Продолжим описание генерации данных для тестирования реализованных нами алгоритмов. Для выбранной исходной версии задачи мы выбирали различные значения σ – от 0.00 до 2.20 с переменным шагом, уменьшающемся по некоторой формуле от 0.05 до 0.01 при увеличении значения σ.

Алгоритмы *для заданного конкретного варианта ЗКВ* применялись следующим образом. Сначала запускался алгоритм имитационной нормализации (эмуляции отжига[9]) и фиксировалось время его работы; отметим, что среднее *время работы* этого алгоритма *невелико* (относительно других рассматриваемых нами эвристических алгоритмов), кроме того, он быстро даёт *хоть какое-то* решение, – именно поэтому мы выбирали этот алгоритм «для фиксации возможного времени работы». После этого запускались остальные алгоритмы – причём в тех из них, в которых необходимо временно́е ограничение (т.е. в т.н. anytime-алгоритмах, [13] и др.), максимальное время работы устанавливалось в 20 раз бо́льшим, чем время работы алгоритма имитационной нормализации.

Все результаты вычислений сравнивались с результатами использованного нами варианта генетического алгоритма[10] – дающего, как правило, *наименее* хорошие результаты. А именно, фиксировался результат работы генетического алгоритма (т. е. значение найденного тура для заданного варианта ЗКВ); результат работы каждого из остальных алгоритмов рассматривался в отношении к результату работы генетического алгоритма. Все отношения усреднялись (бралось среднее геометрическое этих отношений) для всех экспериментов рассматриваемой размерности.[11]

Итак, нами применялись варианты следующих эвристических алгоритмов:

- генетического алгоритма (ГА);
- алгоритма имитационной нормализации (ИН);
- алгоритма локального поиска (Лок);
- незавершённого метода ветвей и границ без дополнительных эвристик (МВГ);
- гибридного алгоритма – комбинации алгоритмов имитационной нормализации, локального поиска и незавершённого метода ветвей и границ (Гиб)

[7] Отметим обоснование выбора максимальной из рассматриваемых нами размерностей, 65. Это значение существенно превосходит реальную матрицу размерности 35, созданную на основе данных, согласованных с [3], – и также несколько превышает такую максимальную размерность случайной ЗКВ (60), для которой *случайная* ЗКВ на современной вычислительной технике с вероятностью, близкой к 1, решается с помощью «простым» МВГ (т.е. без дополнительных эвристик) за реальное время. (Подробнее про случайные ЗКВ как варианты проблемы, а также про решение ЗКВ с помощью МВГ с некоторыми дополнительными эвристиками, см. в [13], [19] и др. процитированных выше работах).

[8] Повторим, что она является либо геометрической версией, либо – *в нашем случае* – подобранной матрицей вероятностей отсутствия аварий.

[9] Повторим примечание переводчика о терминологии, приведённое в [22, стр. 282].

В русской литературе ...обычно применяется другой (по-видимому, неудачный) вариант перевода этого термина – «эмуляция отжига» ... Применяя наш термин – имитационная нормализация – мы «убиваем двух зайцев». Во-первых, он не менее правилен с точки зрения физики. А «вторым зайцем» является то, что этот термин, по-видимому, значительно более удачен как для математической, так и для программистской литературы, т.е. более понятен специалистам в этих областях.

[10] Специально отметим ещё раз, что для этой цели применялся *не* алгоритм имитационной нормализации: её, как уже было отмечено выше, мы применяли для определения временно́го интервала.

[11] Нами также рассматривался вариант усреднения, не учитывающий лучшие 10% и худшие 10% результатов, – однако итоговые значения для всех случаев оказались практически такими же.

(в скобках приведены сокращения, используемые далее в таблице). Отметим, что в отличие от [19] мы здесь не использовали ни т.н. «геометрический подход», ни вариант «муравьиного» алгоритма. Результаты вычислительных экспериментов кратко описываются следующей таблицей 1.

Таблица 1.

dim	ГА	ИН	Лок	МВГ	Гиб
25	1	0.94	0.72	0.77	0.63
35	1	0.89	0.73	0.77	0.61
45	1	0.89	0.74	0.77	0.61
55	1	0.89	0.73	0.76	0.62
65	1	0.87	0.73	0.76	0.62

(По-видимому, измерения с точностью до 3 знаков вряд ли целесообразны.)

Отметим, что результаты похожи на приведённые в [19] – полученные в той публикации *для совсем другой задачи* (по терминологии [6] – для совершенно другого варианта ЗКВ): и значения вычисленных нами величин, и их порядок («место», занятое каждым из алгоритмов) близки к тому варианту (к приведённым в [19] в аналогичной таблице). Впрочем, такая «похожесть результатов» была нами ожидаема.

Также отметим меньшее, чем в [19], изменение полученных значений при увеличении размерности задачи; впрочем, этот факт ещё требует и осмысления, и более строгой математической формулировки. Кроме того, как мы уже отмечали выше, гибридный вариант показал в настоящей задаче ещё большее улучшение (по сравнению с простыми алгоритмами), чем в [19].

Список литературы

[1] Давыдова Е. В., Строгонова Л. Б. *Математические методы в обеспечении безопасности при запуске пилотируемого космического корабля*. Proceedings of International Conference on Innovative Technologies. 2012. С. 121–124.

[2] Давыдова Е. В., Строгонова Л. Б. *Некоторые вопросы математического моделирования при обеспечении безопасности экипажа пилотируемого транспортного корабля на этапе подготовки к пуску*. Научно-технический вестник Поволжья. № 6. 2014. С. 134–140.

[3] Лебедев А. М. *Метод расчета ожидаемого предотвращенного ущерба от авиационных происшествий*. Ульяновск: Изд-во УВАУ ГА, 2007, 155 с.

[4] Краснов С. И., Лебедев А. М., Павлов Н. В. *Математические модели в авиационной безопасности*. Ульяновск: Изд-во УВАУ ГА(И), 2010, 112 с.

[5] Зубков Б. В., Прозоров С. Е., Краснов С. И., Ильин В. М. *Авиационная безопасность*. Ульяновск: Изд-во УВАУ ГА(И), 2014, 411 с.

[6] Garey M., Johnson D. *Computers and Intractability*. USA: W. H. Freeman and Company, 1979, 338 p. (Гэри М., Джонсон Д. *Вычислительные машины и труднорешаемые задачи*. М.: Мир, 1982, 420 с.)

[7] Краснощёков П. С., Петров А. А. *Принципы построения моделей*. М.: Изд-во ФАЗИС ВЦ РАН, 2000, 412 с.

[8] Мышкис А. Д. *Элементы теории математических моделей*. М.: Изд-во КомКнига, 2007, 192 с.

[9] Давыдова Е. В. *Вопросы обеспечения повышения безопасности космонавта при возникновении аварийной ситуации на старте за счет средств медицинского и пространственного контроля*. Современные фундаментальные и прикладные исследования . № 4 (23). 2016. С. 80–87.

[10] Goodman, S., Hedetniemi S. *Introduction to the design and analysis of algorithms*. N.Y.: McGraw-Hill, Inc., 1977, 371 p. (Гудман С., Хидетниеми С. *Введение в разработку и анализ алгоритмов*. М.: Мир, 1981, 368 с.)

[11] Hromkovič J. *Algorithmics for Hard Problems. Introduction to Combinatorial Optimization, Randomization, Approximation, and Heuristics*. Berlin: Springer, 2004, 429 p.

[12] Мельников Б. Ф., Эйрих С. Н. *Подход к комбинированию незавершенного метода ветвей и границ и алгоритма имитационной нормализации*. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. № 1. 2010. С. 35–38.

[13] Melnikov B. *Multiheuristic approach to discrete optimization problems*. Cybernetics and Systems Analysis. Vol. 42. No. 3. 2006. P. 335–341.

[14] Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. *Introduction to Algorithms. – 3rd Ed.*. Massachusetts: MIT Press, 2009, 1312 p.

[15] Dorigo M., Gambardella L. *Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Vol. 1. No. 1. 1997. P. 53–66.

[16] Dorigo M., Gambardella L. *Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*. In “Local Search in Combinatorial Optimization”, eds. Aarts E., Lenstra J. John Wiley Ed. 1997. P. 215–310.

[17] Applegate D., Bixby R., Chátal L., Cook W. *Finding cuts in the TSP (A preliminary report)*. DIMACS Technical Report 95-05, March 1995, 66 p.

[18] Ляликов В. Н. *Исследование оптимизации использования локальных отсечений Concorde*. Вестник Саратовского государственного технического университета. Т. 1. № 1 (30). 2008. С. 68–73.

[19] Макаркин С. Б., Мельников Б. Ф. *Геометрические методы решения псевдогеометрической версии задачи коммивояжера*. Стохастическая оптимизация в информатике. Т. 9. № 2. 2013. С. 54–72.

[20] Мельников Б. Ф., Пивнева С. В., Рогова О. А. *Репрезентативность случайно сгенерированных недетерминированных конечных автоматов с точки зрения соответствующих базисных автоматов*. Стохастическая оптимизация в информатике. Т. 6. № 1-1. 2010. С. 74–82.

[21] Сигал И. Х., Иванова А. П. *Введение в прикладное дискретное программирование*. М.: Физматлит, 2002, 240 с.

[22] Громкович Ю. *Теоретическая информатика. Введение в теорию автоматов, теорию вычислимости, теорию сложности, теорию алгоритмов, рандомизацию, теорию связи и криптографию*. СПб: БХВ, 2010, 338 с.

[23] Мельников Б. Ф., Романов Н. В. *Ещё раз об эвристиках для задачи коммивояжёра*. Теоретические проблемы информатики и ее приложений. Т. 4. 2001. С. 81–86.

[24] Melnikov B., Radionov A., Moseev A., Melnikova E. *Some specific heuristics for situation clustering problems*. In: Proceedings of 1st International Conference on Software and Data Technologies, ICSOFT-2006. Setubal, 2006. P. 272–279.

[25] Melnikov B., Radionov A., Gumayunov V. *Some special heuristics for discrete optimization problems*. In: Proceedings of 8th International Conference on Enterprise Information Systems, ICEIS-2006. Paphos, 2006. P. 360–364.

[26] Melnikov B., Tsyganov A. *Some special heuristics for discrete optimization problems*. In: Proceedings of International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Programming, PAAP-2012. Taipei, 2012. P. 194–201.

[27] Мельников Б. Ф., Сайфуллина Е. Ф. *Применение мультиэвристического подхода для случайной генерации графа с заданным вектором степеней*. Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. № 3 (27). 2013. С. 70–83.

[28] Мельников Б. Ф., Радионов А. Н. *О выборе стратегии в недетерминированных антагонистических играх*. Программирование. Т. 24. № 5. 1998. С. 55–62.

[29] Мельников Б. Ф., Пивнева С. В. *Принятие решений в прикладных задачах с применением динамически подобных функций риска*. Вестник транспорта Поволжья. № 3. 2010. С. 28–33.

[30] Мельников Б. Ф., Мельникова Е. А. *Кластеризация ситуаций в алгоритмах реального времени для задач дискретной оптимизации*. Системы управления и информационные технологии. Т. 28. № 2. 2007. С. 16–20.

Mathematical modeling of increasing the level of safety in case of failures of space technology

Boris Melnikov, Elizaveta Davydova

***Abstract*—As space programs become more sophisticated, the issues of crew safety become more urgent. Due to the extremely high cost of creating and operating manned spacecraft, the cost of losses in case of accidents and failures of aviation and rocket and space technology, and also due to the considerable cost of designing future manned spacecraft, a new approach to ensuring the safety of people at the launch site. For these purposes, we propose to use the mathematical model developed by us to improve the level of safety in the event of an emergency.**

In this paper, we propose a new approach to the formulation of optimization problems intended for simulation of emergency situations. This approach can be briefly described as follows. There are some states in which the simulated technique can be located, and for states we also consider the finite sequences of their switching. Examples of such switching are missile launch, launch cancellation, command to the preliminary stage of traction, etc., and each switching is a transition from one state to another. In this case, there is a possibility that some switching will lead to an accident, we consider all such probabilities given.

The coefficients of the matrices are the logarithms of the probabilities that switching between pairs of states does not lead to an accident. In this case, each sequence of states, i.e., some sequence of switching, gives a logarithm of the general probability of absence of an accident. The model we are considering uses the widely known problem of discrete optimization, namely, the traveling salesman problem. We are striving to ensure that the likelihood of an absence of an accident corresponding to some sequence of switchings would be minimal. Since the traveling salesman problem is difficult to solve, we are usually satisfied with finding some pseudo-optimal solution, which, as we believe, corresponds to a sequence of switches that is reasonably close to optimal.

***Keywords*—emergency, mathematical model, fuzzy logic, problem of discrete optimization, traveling salesman problem.**