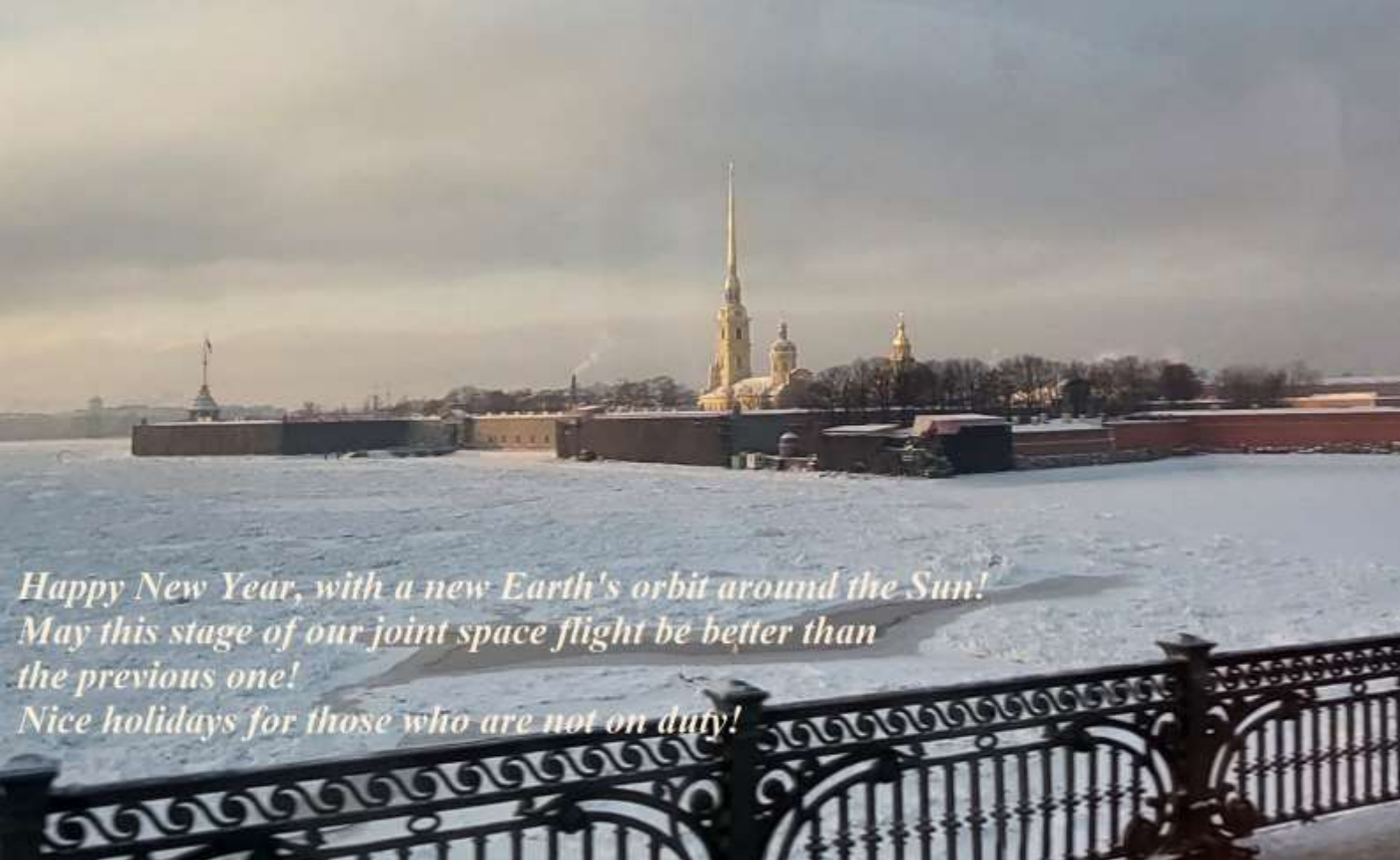




*Happy New Year, with a new Earth's orbit around the Sun!
May this stage of our joint space flight be better than
the previous one!
Nice holidays for those who are not on duty!*

Design Problems and Knowledge Management

Electronic Journal

Issue 8

November - December 2023

On the possibilities of reducing uncertainty in the design: A preliminary analysis

Yuri Spirochkin

Published: 27 December 2023

This article is the third in a series of publications by the author on the problem of uncertainty in the design of complex, energy-saturated and potentially dangerous technical systems: aircraft, spacecraft, nuclear power plants, etc. The first publication (Design Problems and Knowledge Management, Issue 5. <https://spirochkin.wixsite.com/info/journal>) was an introduction to the problem. It provided an overview of existing approaches to accounting for the uncertainty contained in the operating conditions of the system being created, in its response to insufficiently known extreme operational impacts, and in changes that may occur in the system when the intensity of impacts exceeds the ability of the system to withstand them. The purpose of these approaches is to ensure a guaranteed level of safety at the design stage of the system, and for this the existing uncertainty should be minimized.

In the second publication (Design Problems and Knowledge Management, Issue 6. <https://spirochkin.wixsite.com/info/journal>), the structure of uncertainty inherent in the design of technical systems was revealed. In the space of factors influencing design decisions, it is representable by a topological object that consists of an internal “core” corresponding to complete certainty and two surrounding “shells” where two types of uncertainty with fundamentally different properties are “concentrated”. To characterize the heterogeneity of uncertainty within each “shell”, a number of categories have been introduced that take into account its genesis and potential for reduction. The main task of such structuring is to substantiate the search for new approaches to reduce uncertainty in the design – in those areas of this complex and vaguely outlined phenomenon where the methods currently used show insufficient effectiveness.

The possibilities for reducing uncertainty based on this logic are presented below. Their list, which includes both well-known, common methods and less obvious or known techniques, is accompanied by an analysis of applicability to typical design problems. This list, with comments on the results of the analysis, should be considered as a preliminary plan for an updated methodology for dealing with uncertainty, the elements of which need to be tested in practice and adjusted. The revealed possibilities can then become recommendations for designers on the choice and application of appropriate design techniques that can improve the efficiency and safety of the systems intended to operate in difficult-to-predict operating conditions.

О возможностях снижения неопределенности при проектировании: предварительный анализ

Ю.К. Спирочкин

1. Введение

Эта статья является третьей в серии публикаций автора по проблеме неопределенности при проектировании сложных, насыщенных энергией и потенциально опасных технических систем: воздушных судов, космических аппаратов, ядерных энергетических установок и т.п. Первая публикация (Spirochkin 2023b) была введением в проблему: она содержала обзор существующих подходов к учету неопределенности в условиях работы создаваемой системы и ее реакции на недостаточно известные экстремальные эксплуатационные воздействия, а также в изменениях, которые могут произойти в системе, когда интенсивность воздействий превышает способность системы противостоять им. Цель указанных подходов – обеспечение гарантированного уровня безопасности на стадии проектирования системы, для чего имеющаяся неопределенность должна быть сведена к минимуму.

Во второй публикации (Spirochkin 2023c) была выявлена структура неопределенности, свойственной проектированию технических систем. В пространстве факторов, оказывающих влияние на проектные решения, она представима топологическим объектом, который состоит из внутреннего «ядра», соответствующего полной определенности, и двух окружающих его «оболочек», где «сосредоточены» два вида неопределенности с принципиально разными свойствами. Чтобы характеризовать неоднородность неопределенности внутри каждой оболочки, введен ряд категорий, учитывающих ее генезис и потенциал регулирования. Основной задачей такой структуризации является обоснование поиска новых подходов к снижению неопределенности при проектировании – в тех областях этого сложного и смутно очерченного феномена, где применяемые ныне методы показывают недостаточную эффективность.

Ниже представлены базирующиеся на этой логике возможности снижения неопределенности. Их перечень, включающий, как известные, распространенные способы, так и менее очевидные или известные приемы, сопровождается анализом применимости к типовым проектным задачам. Этот перечень с комментариями, касающимися результатов анализа, следует рассматривать как предварительный план обновленной методологии обращения с неопределенностью, элементы которого нуждаются в проверке на практике и уточнении. Выявленные возможности могут стать тогда рекомендациями для проектировщиков по выбору и применению соответствующих методик проектирования, способных повысить эффективность и безопасность создаваемых систем в трудно предсказуемых условиях эксплуатации.

Среди возможностей снижения неопределенности, рассматриваются следующие:

- 1) получение новых знаний о неопределенных факторах, которые следует учитывать при проектировании, путем исследований и разработок;
- 2) расширение объекта проектного анализа с учетом окружения, с которым предусматривается взаимодействие технической системы;
- 3) совершенствование методов и средств обоснования проектных решений;

- 4) реконструкция неизвестных (характеризующих неопределенные или плохо определенные свойства, события или процессы) по фрагментам информации, в том числе слабым и косвенным признакам;
- 5) постулирование наихудшего события (или исхода);
- 6) ограничение потенциальных потерь (без анализа инициирующих событий и рисков);
- 7) использование интуиции.

2. Получение новых знаний

Возможность снижения неопределенности за счет получения новых знаний распространяется как на известные неопределенные факторы, соответствующие второй области пространства Φ , в которой решается проектная задача, так и на неизвестные факторы, относящиеся к третьей области (Spirochkin 2023c). Эта возможность реализуется путем исследований, включая физические эксперименты (исследовательские и поисковые), математическое моделирование (симуляции) и логический анализ информации, а также разработок, к которым относятся формирование подходов к проблемам, обоснование идей и концепций, построение научных теорий и создание инструментов исследований (физических устройств, математических моделей, методов).

Перечисленное представляет собой универсальный и наиболее надежный набор способов снижения неопределенности всех категорий, но обращение к тому или иному способу может сопровождаться значительными затратами – в терминах времени, трудоемкости и денег. Применительно ко второй области пространства Φ средства из этого набора могут использоваться для снижения неопределенности развития ситуации. Такая неопределенность свойственна, например, процессам развития аварий, анализ которых проводят при проектировании атомных энергетических установок. Иницирующим событием может быть неблагоприятная комбинация свойств элементов и эксплуатационных параметров в условиях стохастической вариации, влекущая за собой необратимые нарушения в работе системы с плохо представимыми последствиями. Худшим вариантом развития ситуации является т.н. «тяжелая» авария, сопровождаемая функциональными отказами важных для безопасности элементов установки, включая нарушение целостности первого контура – вплоть до разрушения реактора и выхода радиоактивных веществ в окружающую среду. Получение путем физических и математических экспериментов знаний о возможном поведении установки и точках бифуркации на пути эволюции аварии призвано дать необходимую определенность для выработки конструктивных мер и управляющих воздействий с целью предотвращения худшего сценария.

Это особенно актуально для атомных энергетических установок новых типов, принадлежащих к поколению IV, для которого заявлено свойство «внутренне присущей безопасности». Проблема состоит в том, что такое свойство декларируется, исходя из априорных, хотя и основанных на логике, представлений проектировщиков, однако оно пока не проверено в экспериментах, тем более в условиях реальной эксплуатации.

В третьей области пространства Φ указанные выше способы получения новых знаний могут снизить в той или иной степени неопределенность, вызываемую:

- неполнотой прикладных (технических) знаний;
- возникновением у системы свойств;
- проявлениями человеческого фактора;

– недостатком фундаментальных знаний о мире.

3. Снижение неопределенности за счет расширения объекта анализа

Возможность снижения неопределенности за счет расширения объекта проектного анализа продемонстрируем на примерах, относящихся к проектированию конструкции. Она представляет собой часть проектируемой технической системы, и функция конструкции состоит в том, чтобы нести нагрузки, действующие на систему при эксплуатации. В проектировании конструкции выделяются два этапа. На первом этапе определяют, исходя из назначения системы, основные размеры конструкции, а на втором выполняют расчеты по проверке ее работоспособности, главным показателем которой является прочность, или целостность¹. Обычный поверочный расчет на прочность состоит в определении напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции при действии нагрузок, соответствующих установленным расчетным случаям, и оценки допустимости найденных напряжений и перемещений по критериям прочности. Значения нагрузок в каждом конкретном расчетном случае могут быть заранее не известны, и их находят путем теплового, гидравлического, аэродинамического или иного предварительного расчета. Основой расчета на прочность является закон Гука, предполагающий линейную зависимость напряжений от деформаций. Он связан с рядом других предположений: о малости перемещений, неизменяемости состояния, в том числе геометрии, конструкции и независимости приложенных нагрузок от НДС. Механическое поведение конструкции при таких предположениях описывается достаточно простыми, линейными уравнениями равновесия, которым свойственна определенность решения.

Но в некоторых режимах эксплуатации поведение конструкции имеет сложный характер со значительной долей неопределенности. Неопределенность вызывается нелинейностью реакции на приложенную нагрузку или связанностью с поведением окружающей среды, в том числе твердых объектов, с которыми конструкция находится в контакте.

Нелинейность, или непропорциональность реакции конструкции при изменении интенсивности нагрузки может быть следствием изменения состояния системы в процессе нагружения. Если отклонения от линейности и изменение состояния недопустимы с точки зрения безопасности (например, когда они свидетельствуют о потере несущей способности важных для безопасности элементов), условия их возникновения при проектировании стремятся исключить. К недопустимому изменению состояния относится, в частности, потеря устойчивости несущих элементов конструкции под действием нагрузок, вызывающих сжимающие напряжения. При некоторых уровнях напряжений, соответствующих т.н. *критическому значению* нагрузки, у гибких или тонкостенных элементов появляются перемещения в направлениях, отличающихся от направлений основных компонентов напряжений, и происходит выпучивание. Перемещения выпучивания существенно нарастают даже при незначительном изменении нагрузки сверх

¹ Понятие целостности используется наряду с прочностью. Оно является обобщенной характеристикой конструкции как совокупности элементов, в том числе узлов и деталей. Для сосудов, удерживающих давление, целостность включает сплошность материала и герметичность разъемных соединений. Трещины в стенках сосудов давления или неплотные стыки могут не оказывать влияния на прочность основной конструкции (до определенного предела), но утечка через них жидкого или газообразного содержимого свидетельствует о нарушении целостности.

критического значения, и первоначальная форма элемента изменяется настолько, что он перестает сопротивляться сжатию (теряет устойчивость).

Опасность потери устойчивости обуславливает необходимость ее рассмотрения при проектировании путем соответствующего анализа, проводимого в рамках расчета на прочность. Для снижения вычислительных затрат (а также ошибок численного решения) при обычном поверочном расчете число уравнений равновесия стараются уменьшить, рассматривая НДС минимальной размерности, соответствующий схеме нагружения (с приемлемыми упрощениями). Так, анализ растяжения элементов конструкции, моделируемых стержнями, проводят в предположении одномерного характера НДС и наличия только осевых перемещений. Растяжение и сдвиг пластин в плоскости анализируют в рамках двумерного НДС, с двумя составляющими перемещений, и т.д. Однако с помощью подобных «минимальных» моделей нельзя выполнить анализ устойчивости, ибо он требует принятия во внимание поперечных или выходящих из плоскости перемещений. Чтобы определить условия потери устойчивости и при необходимости картину развития этого процесса, расчетную модель конструкции (систему уравнений равновесия) расширяют путем добавления в нее новых степеней свободы², характеризующих изменение формы элементов в условиях больших перемещений, и новых членов, учитывающих работу приложенных нагрузок на этих перемещениях. В результате анализа находят критические значения сжимающих сил или давления. Иногда искомыми выходными данными могут быть и перемещения выпучивания. Если нагрузки, действующие при эксплуатации на элементы конструкции, не превышают найденные критические значения, устойчивость считается обеспеченной. В противном случае в конструкцию вносят изменения (направленные на увеличение жесткости) и повторяют анализ, пока устойчивость не будет достигнута. Таким образом, осуществляется снижение неопределенности поведения конструкции ввиду возможной потери устойчивости, вплоть до полного ее устранения.

Специфические виды неустойчивости могут возникать при обтекании деформируемой конструкции потоком газа или жидкости (что характерно для летательных аппаратов, энергетических установок, высотных зданий и сооружений) или перемещений в условиях контакта с твердой средой, оказывающей сопротивление (движении железнодорожного состава по рельсам, режущего инструмента при механической обработке и т.п.). Неустойчивость проявляется в виде аэроупругих или гидроупругих деформаций податливых элементов³ либо в виде автоколебаний⁴, захватывающих всю конструкцию и нарастающих неконтролируемым образом. Подобные процессы инициируются при некотором сочетании свойств среды, скорости ее относительного движения (*критической скорости*) и механических параметров конструкции. В каждом конкретном случае это сочетание априори не известно, и его определяют путем анализа устойчивости как части поверочного расчета на прочность. Но в отличие от обычного расчета, проводимого в рамках указанных выше предположений, анализ устойчивости при взаимодействии со средой проводят с помощью расширенной расчетной модели, которая учитывает:

² Независимых переменных, описывающих поведение механической системы, в данном случае поперечных перемещений и углов поворота сечений элементов.

³ В самолетостроении для аэроупругих деформаций элементов конструкции используют термин «бафтинг».

⁴ У воздушных судов – это флаттер и шимми, у наземных сооружений – галопирование.

- увеличенный диапазон перемещений с возможностью описания формоизменения элементов конструкции под нагрузкой и
- воздействие среды на элементы в их деформированном состоянии.

Для приближенного моделирования указанного воздействия уравнения статического или динамического равновесия конструкции дополняют членами, характеризующими давление газа или жидкости на элементы посредством локальных аэро- или гидродинамических коэффициентов либо имитирующими сопротивление твердой среды. В целях большей точности в первом случае рассматривают дополнительные уравнения, описывающие поведение движущейся среды при обтекании конструкции, например, уравнения Навье-Стокса.

Результатом анализа является значение критической скорости движения среды (относительно конструкции). Если скорость, предусмотренная в проекте системы, не превышает найденное значение, то неустойчивость можно считать практически исключенной. Иначе прибегают к конструктивным и другим мерам, обеспечивающим необходимую устойчивость. Вместе с исключением потери устойчивости устраняется и неопределенность поведения конструкции, вызываемая нелинейностью и связанностью.

Для некоторых случаев взаимодействия конструкции с жидкой средой нелинейностью можно пренебречь, и единственным фактором сложности поведения остается связанность. К *связанным задачам*, решаемым при проектировании, относится расчет колебаний конструкции, погруженной в жидкость или содержащей жидкость во внутренних полостях. Частоты колебаний в таких случаях существенно ниже значений, что свойственны «сухой» конструкции, и связанная динамическая реакция характеризуется неопределенностью спектра и амплитуд основных тонов. Когда смачиваемая поверхность конструкции и объем, занимаемый жидкостью, имеют сложную конфигурацию, и аналитические оценки по формулам не применимы, неопределенность устраняют путем численного решения проблемы собственных значений для расширенной механической системы.

Наиболее простой вариант расширения предполагает малые амплитуды связанных колебаний и отсутствие волн на поверхности жидкости. В рассмотрение вводятся дополнительные степени свободы, характеризующие изменение гидродинамического давления в объеме жидкости, а также соотношения, описывающие действие этого давления на смачиваемую поверхность конструкции. Учет взаимодействия с жидкостью при этом сводится к добавлению найденных по соответствующему алгоритму значений ее присоединенных масс и моментов инерции к параметрам инерции конструкции в направлениях степеней свободы последней. В результате решения проблемы собственных значений с дополненными параметрами инерции определяют собственные частоты и формы связанных колебаний. Методика такого расчета, основанная на конечноэлементном моделировании конструкции и объемов жидкости, была разработана автором статьи применительно к реакторам типа ВВЭР (НИИПММ 1997), (Спирочкин 1997), (Спирочкин 1998), (Spirochkin 2011).

При наличии у жидкости свободной поверхности динамические воздействия могут вызывать, кроме изменения гидродинамического давления внутри ее объема, гравитационные волны (плескание жидкости). Для рассмотрения движения свободной поверхности в расширенную модель добавляют степени свободы, описывающие его, и соотношения, характеризующие изменение гравитационного потенциала жидкости в

зависимости от высоты волн. В результате в спектре динамической реакции системы «конструкция-жидкость» появляются дополнительные (по отношению к колебаниям конструкции) тона, связанных с движением свободной поверхности и прилегающих к ней слоев жидкости. Соответствующие положения были внесены автором статьи в проект российского стандарта по расчету на прочность оборудования и трубопроводов АЭУ с использованием метода конечных элементов.

Описание подобных приемов устранения неопределенности можно продолжить, но даже приведенные выше допускают обобщение в виде *принципа расширения*: если задача не разрешима на данном уровне, ее следует решать в расширенной постановке, на более высоком уровне рассмотрения⁵. Воплощением этого принципа являются современные способы защиты проектируемого воздушного судна от флаттера. Для высокоскоростных и оптимизированных по массе самолетов, прежде всего, военных, исключение аэроупругих колебаний конструкции за счет повышения ее жесткости или ограничения скорости полета не всегда осуществимо. Проблему решают путем создания комплекса, включающего, кроме конструкции самолета, систему подавления флаттера – пассивную или активную, действующую на основе автоматического регулирования – см., например, (Кузьмина и др. 2020), (Андреевский и др. 2021).

Представляется целесообразным исследование и других приложений принципа расширения для снижения неопределенности поведения технических систем на стадии проектирования.

4. Совершенствование методов и средств обоснования проектных решений

К методам и средствам обоснования проектных решений относятся физические эксперименты, математическое моделирование (расчеты, симуляции) и использование информационных моделей⁶. С помощью такого инструментария подтверждают соответствие решения цели или обнаруживают его ошибочность, выявляют границы применимости решения и особенности поведения технической системы при его реализации, определяют физические параметры системы и идентифицируют построенные модели. Как уже неоднократно отмечалось выше, условиям работы создаваемой системы, ее реакции на некоторые эксплуатационные воздействия и изменения, которые могут произойти в системе при взаимодействии с окружающей средой, свойственна неопределенность. Эта неопределенность отражается в погрешностях входных данных экспериментов или моделирования и трансформируется в погрешности результатов. Кроме того, любой метод и любое средство обработки данных вносят свои, «инструментальные» погрешности. В итоге на выходе анализа проектировщики сталкиваются с совокупной неопределенностью. Этот раздел фокусируется на возможности снижения той ее составляющей, которая обусловлена применяемыми методами и средствами обоснования.

В качестве примера рассмотрим обоснование проектных решений, принимаемых с целью обеспечения выживания людей на борту воздушного судна при его аварийной посадке, согласно концепции безопасного разрушения. Для обоснования проводят физические эксперименты и расчеты с использованием математических моделей. На

⁵ Формулировку такой идеи приписывают А. Эйнштейну.

⁶ Информационная модель – это упорядоченная совокупность информации, которая дает понимание об объекте, явлении или процессе без проведения расчета (в отличие от математической модели). К информационным моделям относятся тексты, таблицы, графики, блок-схемы и т.п.

начальных этапах проектирования применимы информационные модели, обобщающие экспериментальные данные, в том числе статистику авиационных происшествий, и результаты расчетов. С состоянием соответствующих исследований и разработок можно ознакомиться в книге Spirochkin (2023a).

Наиболее показательными экспериментами считаются бросковые испытания секций фюзеляжей воздушных судов, а также сравнительно небольших самолетов и вертолетов, которые проводятся с США на специальных стендах (Jackson and Fasanella 2003), (NASA 2020). Объекты испытаний включает конструктивные элементы и узлы, способные поглощать энергию удара за счет программируемого разрушения, обеспечивать сохранение жизненного объема кабины и выполнение других критериев выживания при авариях. Самым сложным и дорогостоящим экспериментом такого рода был управляемый удар о землю транспортного самолета Boeing 720 в реальном полете (McComb et al. 1987), (NASA Wiki 2016). Эксперименты сопровождаются математическим моделированием поведения конструкции при ударе с помощью компьютерных программ, как правило, реализующих метод конечных элементов.

Работы по обеспечению безопасности в случае аварийной посадки проводились и в СССР при создании транспортной космической системы «Энергия-Буран» (Spirochkin 2023a). Основным инструментом обоснования проектных решений, учитывающих возможность отказа шасси «Бурана»⁷ при возвращении на Землю, было математическое моделирование. Значительное внимание в ходе обоснования уделялось влиянию на безопасность массы и жесткости крепления грузов и оборудования. Роль физических экспериментов состояла в верификации конечноэлементной модели конструкции советского челнока с полезным грузом (для этого использовались результаты горизонтальных частотных испытаний летного образца) и определении параметров той части модели, которая описывала взаимодействие конструкции с посадочной поверхностью (была предусмотрена соответствующая экспериментальная установка). Следует отметить, что американскими коллегами никаких исследований возможной аварийной посадки *Space Shuttle* не проводилось.

Наиболее известной информационной моделью, применяемой при проектировании транспортных воздушных судов согласно требованиям безопасной аварийной посадки, можно считать положения нормативных документов, содержащие значения расчетных ускорений, посредством которых регламентируется прочность узлов крепления грузов и оборудования, включая кресла для людей на борту – см., например, (14 CFR Part 25), (АП-25 2009), (CS-25 2018). Существуют информационные модели и других видов.

Все три инструмента обоснования проектных решений по обеспечению выживания людей на борту воздушного судна в рассматриваемой аварийной ситуации, порождают неопределенность. При экспериментах она обуславливается проблемами:

- представительности (ибо исследуется поведение конкретных образцов в конкретных условиях, а не весь диапазон возможной вариации параметров);
- точности и надежности методов регистрации и обработки экспериментальных данных (ввиду ограниченной разрешающей способности датчиков, наличия «шумов» и влияния различных погрешностей);
- применимости результатов экспериментов к воздушным судам и условиям аварийной посадки, которые отличаются от исследуемых.

⁷ Он был летательным аппаратом самолетного типа.

Математическое моделирование позволяет учитывать множество факторов, в том числе недоступных в экспериментах, и проводить исследования в широком диапазоне вариации параметров (виртуальные «полевые эксперименты»). При этом неопределенность возникает, прежде всего, ввиду сложности поведения конструкции воздушного судна в условиях взаимодействия с посадочной поверхностью и разрушения в процессе взаимодействия (динамика конструкции характеризуется нелинейностью и связанностью – факторами неопределенности, рассмотренными в разделе 3). Неопределенность усиливается вследствие погрешностей численного решения нелинейной задачи, которые сложно оценить. Дополнительными источниками неопределенности являются:

- влияние на поведение конструкции колебаний транспортируемых грузов и оборудования большой массы на узлах крепления (неопределенность из-за связанности и/или возникновения у системы свойств);
- возможность экипажа управлять воздушным судном до посадочного удара (неопределенность проявлений человеческого фактора);
- опасность разрушения двигателей, топливных баков и грузов с возможностью пожара и взрыва (неопределенность развития ситуации и/или неопределенность из-за неполноты прикладных знаний).

При обосновании проектных решений с помощью математического моделирования все эти аспекты неопределенности должны быть приняты во внимание.

Происхождение значений ускорений в информационной модели, регламентирующей прочность узлов крепления грузов и оборудования транспортных воздушных судов, недостаточно ясно (в отличие от военных самолетов и вертолетов, для которых подобная история известна – см. ниже). Предположительно, эти значения получены путем обобщения статистики реальных аварий и результатов каких-либо экспериментов. Неизвестно, учтены ли в них особенности конструкций разных воздушных судов и различные условия аварийной посадки. Однако даже при наличии общего экспериментального основания, для каждого конкретного летательного аппарата эти значения являются априорными, а возможность их распространения на новые типы воздушных судов характеризуется неопределенностью соответствующей категории (Spirochkin 2023c).

Результирующая неопределенность обоснования проектных решений может быть значительной, но она допускает снижение за счет совершенствования применяемых инструментов. В физических экспериментах наблюдается переход к более адекватным объектам испытаний и условиям удара, близких к реальным аварийным посадкам самолетов и вертолетов. Так, вертикальные бросковые испытания секций или макетов поглощающего энергию нижних частей фюзеляжей сменяются испытаниями полноразмерных воздушных судов с воспроизведением горизонтального движения и угла тангажа. В этих экспериментах становится возможным изучать деформации и динамическое поведение всей конструкции воздушного судна, а также особенности скользящего контакта с посадочной поверхностью. (Jackson and Fasanella 2003), (NASA 2020).

Совершенствуется и математическое моделирование. Анализ возможной аварийной посадки «Бурана» превосходил предшествующие или проводимые в тот же период работы американских коллег следующим (Спирочкин 1987), (Спирочкин 1993):

- процессы деформирования конструкции фюзеляжа и потери его элементами несущей способности в условиях посадочного удара описывались в рамках трехмерной конечноэлементной модели, которая имела значительное по тем временам число степеней свободы (около 2 тысяч);
- имитировалось взаимодействие фюзеляжа с посадочными поверхностями различных типов, и учитывались их динамические свойства, в том числе, с использованием экспериментальных данных, накопленных при отработке приземлений советских космических аппаратов;
- принимались во внимание варьируемые параметры движения летательного аппарата в момент касания посадочной поверхности, в частности вертикальная посадочная скорость и угол атаки;
- рассматривались колебания упруго подвешенных масс, включая грузы большой массы.

Наряду с влиянием на динамику конструкции и условия безопасности указанных факторов, исследовались погрешности конечноэлементного моделирования и численного решения нелинейных уравнений динамического равновесия.

Дальнейшее совершенствование математических моделей и методов анализа в американских и европейских исследованиях аварийной посадки воздушных судов шло в направлениях⁸ (Jackson et al. 2006), (Fuchs and Jackson 2008), (Ren and Xiang 2014), (Guida et al. 2018):

- развития конечноэлементной схематизации конструкции (в основном за счет увеличения количества степеней свободы);
- рассмотрения поведения кресел, динамической реакции человеческого тела, работы привязных ремней и других средств пассивной безопасности;
- уточненного описания работы энергопоглощающих элементов, в том числе выполненных из неметаллических и композитных материалов;
- учета особенностей контактного взаимодействия с посадочной поверхностью.

Эти направления сохраняются и поныне, несмотря на заметное ослабление интереса производителей авиационной техники к концепции безопасного разрушения.

В части информационного моделирования более совершенными средствами обоснования проектных решений по сравнению с регламентируемыми ускорениями в центрах масс грузов и оборудования следует считать критерии оценки безопасности военных летательных аппаратов в случае аварийной посадки (MIL-STD-1290A 1988), (USAAVSCOM TR 89-D-22B 1989), (USAAVSCOM TR 89-D-22C 1989). Преимущество таких информационных моделей определяется рядом их особенностей. Во-первых, имеется документированная история происхождения численных значений критериев. Во-вторых, устанавливается ряд факторов, оказывающих влияние на выживание людей на борту (допустимые ускорения, сохранение жизненного объема кабины, исключение соударений пилотов с элементами интерьера, минимизация опасности пожара и т.д.). В-третьих, значения критериев сопоставлены с условиями посадки и основными характеристиками летательного аппарата. Важным обстоятельством является также описание действующих при ударе ускорений импульсами квазитреугольной или трапецевидной формы с определенными временными характеристиками.

В качестве следующего шага на пути совершенствования информационных моделей можно рассматривать аппроксимацию результатов физических и

⁸ Не все из перечисленных направлений были реализованы в одной и той же модели.

вычислительных «полевых экспериментов» подходящими аналитическими зависимостями. Так, амплитуды импульсов вертикальных ускорений, действующих при ударе воздушного судна о твердую посадочную поверхность в условиях скольжения (без зарывания в грунт), допускают следующее приближенное представление (Spirochkin 2023a):

$$a_{max} = a_{max}(b, r, M, f_1, \lambda_l, \sigma_l, V)$$

где b – характерный размер воздушного судна, определяющий область приложения ударной нагрузки, например, диаметр фюзеляжа;

r – радиус кривизны этой области (оказывающий влияние на градиент нарастания ударной нагрузки при деформировании конструкции в направлении нормали);

M – масса воздушного судна;

f_1 – основная (как правило, первая) частота колебаний конструкции, возбуждаемых при посадочном ударе;

λ_l – локальная податливость области приложения ударной нагрузки в направлении нормали;

σ_l – напряжение, характеризующее локальную потерю несущей способности конструкции при приложении ударной нагрузки;

V – вертикальная скорость воздушного судна в момент удара.

Для превращения этого структурного выражения в искомую числовую зависимость необходим большой объем данных. Однако после их получения и обработки снижается потребность в натурных экспериментах⁹ или в математическом моделировании с большими затратами вычислительных ресурсов.

Методологию снижения неопределенности за счет совершенствования физического, математического и информационного инструментария, изложенную выше на примере обеспечения безопасности при аварийной посадке воздушного судна, можно распространить на другие случаи обоснования проектных решений. Полезными в этом отношении представляются положения по обращению с неопределенностью при испытаниях, вошедшие в стандарт (ASME 2005). Что касается неопределенности, вызванной погрешностями математического моделирования, интересны публикации Oberkampf and Roy (2010), Roy and Oberkampf (2011).

Для снижения совокупной «инструментальной» неопределенности важным является не только совершенствование каждого из трех рассматриваемых инструментов, но и их эффективное сочетание. Так, физические эксперименты целесообразно проводить не для подтверждения правильности того или иного проектного решения (при большом числе факторов и широких диапазонах их изменения это вряд ли осуществимо), а для обнаружения некорректности решения или границ его применимости. Экспериментальные данные представляются ценными для верификации построенных математических моделей и здесь они трудно заменимы. При обосновании проектных решений, подверженных влиянию множества факторов, приоритет должен быть отдан математическому моделированию, ибо оно делает возможным проведение обширных полевых исследований. При выработке проектных решений и их первоначальной оценке (без использования компьютеров) лучшим средством являются информационные модели – в

⁹ Такие эксперименты являются сложными, дорогостоящими и потенциально опасными для людей и окружающей среды. Их дополнительный, если не ключевой, недостаток состоит в том, что испытываемое воздушное судно уже создано, поэтому, если по результатам испытаний потребуются существенные конструктивные изменения, они могут быть проблематичны.

Библиография

- АП-25 (2009) Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории, 3-е изд. Межгосударственный авиационный комитет, М.
- Андриевский БР, Кузнецов НВ, Кудряшова ЕВ, Кузнецова ОА (2021) Крутильно-изгибный флаттер крыла: математические модели, исследование и предотвращение. Обзор. Дифференциальные уравнения и процессы управления, 4:116-191. <https://cyberleninka.ru/article/n/krutilno-izgibnyy-flatter-kryla-matematicheskie-modeli-issledovanie-i-predotvraschenie-obzor>. Доступ: 2023-12-19
- Кузьмина СИ, Ишмуратов ФЗ, Поповский ВН, Карась ОВ (2020) Анализ динамической реакции и эффективности системы подавления флаттера магистрального самолета в транзвуковом режиме полета. Вестник Московского авиационного института, 27(1):108-121
- НИИПММ (1997) Математическое моделирование динамических процессов и диагностика оборудования первого контура АЭС с ВВЭР-1000. Отчет. НИИ прикладной математики и механики, МГТУ им. Н.Э. Баумана, М. (Исполнители: Кинелев В.Г., Дронг В.И., Перов С.Л., Спирочкин Ю.К.)
- Спирочкин ЮК (1987) Методика расчета динамического нагружения грузов при аварийной посадке летательного аппарата. Диссертация. НПО «Энергия», г. Калининград Московской области (Защищена в ЦНИИмаш, г. Калининград Московской области, 1988)
- Спирочкин ЮК (1993) Компьютерное моделирование динамики конструкций при авариях. Математическое моделирование, 5(6):85-103
- Спирочкин ЮК (1997) Система виброшумовой диагностики реакторных установок типа ВВЭР. Программное обеспечение для конечноэлементного анализа конструкций *NewTone*. Версия 1.5. Специальная конфигурация для расчета динамических характеристик конструкции в жидкости. Руководство пользователя. Концерн «Росэнергоатом», Центр неразрушающего контроля и диагностики ДИАПРОМ, М.
- Спирочкин ЮК (1998) Конечноэлементное моделирование динамики оболочек, взаимодействующих с тонкими слоями жидкости. Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов: Межвузовский сборник, выпуск 58, с 110-121
- 14 CFR Part 25. Code of Federal Regulations / Title 14 / Chapter I / Subchapter C / Part 25 – Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes. <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-C/part-25>. Accessed 2023-12-22
- ASME (2005) ASME PTC 19.1-2005 (Revision of ASME PTC 19.1-1998) Test uncertainty. An American National Standard. The American Society of Mechanical Engineers (ASME), New York
- Fuchs YT, Jackson KE (2008) Vertical drop testing and analysis of the WASP helicopter skid gear. (Presented at The American Helicopter Society 64th Annual Forum, Montreal, Canada, April 29 – May 1, 2008). Journal of the American Helicopter Society 56(1):12005-1–12005-10
- Guida M, Marulo F, Abrate S (2018) Advances in crash dynamics for aircraft safety. Progress in Aerospace Sciences 98:106–123

- Jackson KE and Fasanella EL (2003) A survey of research performed at NASA Langley Research Center's Impact Dynamics Research Facility. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA. <https://www.researchgate.net/publication/266370987>. Accessed 2023-12-21
- Jackson KE, Boitnott RL, Fasanella EL, Jones LE and Lyle KH (2006) A summary of DOD-sponsored research performed at NASA Langley's Impact Dynamics Research Facility. Journal of the American Helicopter Society 51(1):59-69
- CS-25 (2018) Certification Specifications for large aeroplanes (Amendment 21). European Aviation Safety Agency, Brussels
- McComb HG Jr, Thomson RG and Hayduk RJ (1987) Structural dynamics research in a full-scale transport aircraft crash test. Journal of Aircraft 24(7):447-453
- MIL-STD-1290A (AV) (1988) Military standard. Light fixed and rotary-wing aircraft crash resistance. U.S. Department of Defense, Washington, DC
- Oberkampf WL, Roy CJ (2010) Verification and validation in scientific computing. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- NASA (2020) National Aeronautic and Space Administration. Langley's 2019 Annual Report. Innovation, Discovery, Exploration. NASA Langley Research Center, January 13, 2020. <https://www.nasa.gov/langley/overview/2019-annual-report-embed>. Accessed 2023-12-21
- NASA Wiki (2016) National Aeronautics and Space Administration Wiki / Fandom. Controlled Impact Demonstration (CID), August 30, 2016. https://nasa.fandom.com/wiki/Controlled_Impact_Demonstration. Accessed 2023-12-21
- Ren Y, Xiang J (2014) Energy absorption structures design of civil aircraft to improve crashworthiness. The Aeronautical Journal 118(1202):383-398
- Roy CJ, Oberkampf WL (2011) A comprehensive framework for verification, validation, and uncertainty quantification in scientific computing. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 200, Issues 25-28, p 2131-2144
- Spirochkin Y (2011) Special finite elements in structural dynamics. Vibration Problems ICOVP 2011. Supplement. The 10th International Conference on Vibration Problems. Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic, p 168-173
- Spirochkin Y (2023a) Human factors and design. Springer, Singapore
- Spirochkin Y (2023b) On the problem of uncertainty in the design of technical systems – Introduction. Design Problems and Knowledge Management (Electronic journal), Issue 5, June 2023. <https://spirochkin.wixsite.com/info/journal>
- Spirochkin Y (2023c) On the structure of uncertainty in the design. Design Problems and Knowledge Management (Electronic journal), Issue 6, July-August 2023. <https://spirochkin.wixsite.com/info/journal>
- USAAVSCOM TR 89-D-22B (1989) Aircraft crash survival design guide. Volume II – Aircraft design crash impact conditions and human tolerance. Final report. Simula Inc., Phoenix, AZ
- USAAVSCOM TR 89-D-22C (1989) Aircraft crash survival design guide. Volume III – Aircraft structural crash resistance. Final report. Simula Inc., Phoenix, AZ