



Design Problems and Knowledge Management

Electronic Journal

Volume 2, Issue 4

July - August 2024

In this issue:

<i>Yuri Spirochkin</i>	On uncertainty in the design of technical systems (Abstract, Contents, Keywords)	2
<i>Ю.К. Спирочкин</i>	О неопределенности при проектировании технических систем (Полный текст на русском языке)	4

Editor and publisher: Dr. Yuri Spirochkin, Saint Petersburg, Russia
yu.spirochkin@gmail.com

Date of publication: August 30, 2024

Recommended citation format (Harvard style):

Author (2024) *Article title*. Design Problems and Knowledge Management, 2(4): *pages*.
<https://spirochkin.wixsite.com/info/journal>. Accessed *date*

On uncertainty in the design of technical systems

Yuri Spirochkin

Abstract

This article discusses the issue of uncertainty faced by designers of aircraft, space and aerospace vehicles, nuclear power plants or other complex technical systems at the design stage. Uncertainty covers the range from stochastic variation in the values of known variables: system properties and factors acting under typical operating conditions, to the lack of knowledge about all possible adverse events during the service life and the behavior of the system in such situations. Errors in forecasting extreme impacts and the system's ability to withstand them create a threat of an accident or disaster with the possibility of significant material losses, damage to the environment and fatal consequences for human life or health. Obviously, such a threat must be minimized during the design process.

The article analyzes existing methods of accounting and regulating uncertainty, which are based on its understanding as a combination of aleatory and epistemic components, and on a quantitative assessment of the first of them, representable in the form of risk, as well as on the possibility of reducing it based on the experience of creating and operating similar systems. These methods, despite the high level of their development, leave unresolved the problems of risk substantiation with insufficient statistical data or forecasting events that go beyond the experience, i.e. when ensuring safety in conditions of unknown factors. In order to solve such problems and find ways to minimize the epistemic component in design, more detailed vision of the structure of uncertainty and the genesis of its various items is presented. Seven main sources of uncertainty are identified. Limitations are revealed that are inherent in the currently used methods of quantification of the aleatory component of uncertainty and contribute to the epistemic component. The elaborated ideas allow, if not to eliminate, then to significantly smooth out the indicated limitations, as well as to substantiate a number of methods for regulating the epistemic component.

The object of the research is a wide range of engineering approaches to reducing uncertainty at the design stage: from existing and commonly used methods to promising concepts under development. Each of these approaches makes it possible to refine to some extent the a priori, based on previous statistics, assumptions about the behavior of the system being created at the operation stage by obtaining and appropriately processing current relevant information. The most effective in this regard seems to be a SPARS design concept, which provides for the creation of a Smart, ProActive, Resilient System.

Contents

- 1 Introduction
- 2 Improving understanding of uncertainty in design
- 3 Analysis of existing approaches to uncertainty reduction
 - 3.1 Refinement of probability characteristics
 - 3.2 Experimental determination of the actual system properties and loads
 - 3.3 Pilot projects
 - 3.4 In-service monitoring and condition diagnostics

4 Promising approaches to reducing uncertainty

4.1 Identification and analysis of markers of potential sources of epistemic uncertainty

4.2 Information support of the life cycle

4.3 Designing a Smart, ProActive, Resilient System (SPARS Concept)

Conclusion

References

Keywords

Uncertainty, design, safety, risk, probability, unknown

О неопределенности при проектировании технических систем

Ю.К. Спирочкин

В этой статье рассматривается проблема неопределенности, с которой сталкиваются разработчики воздушных судов, космических и аэрокосмических летательных аппаратов, ядерных энергетических установок или других сложных технических систем на стадии их проектирования. Неопределенность охватывает диапазон от стохастической вариации значений известных переменных: свойств системы и факторов, действующих на нее в типовых условиях эксплуатации, до отсутствия знаний обо всех возможных неблагоприятных событиях в течение срока службы и поведении системы в таких ситуациях. Ошибки в прогнозировании экстремальных воздействий и способности системы противостоять им создают угрозу аварии или катастрофы с возможностью значительных материальных потерь, ущерба для окружающей среды и фатальных последствий для жизни и здоровья людей. Очевидно, что в процессе проектирования подобная угроза должны быть сведена к минимуму.

В статье анализируются существующие методы учета и регулирования неопределенности, которые основываются на ее понимании как комбинации алеаторной и эпистемической составляющих, количественной оценке первой из них, представимой в виде риска, и возможностях ее снижения, исходя из опыта создания и эксплуатации аналогичных систем. Эти методы, несмотря на высокий уровень их развития, оставляют нерешенными проблемы обоснования риска при недостаточном объеме статистических данных и прогнозировании событий, выходящих за пределы имеющегося опыта, т.е. при обеспечении безопасности с учетом неизвестных факторов. С целью решения таких проблем и поиска путей минимизации эпистемической составляющей при проектировании выработаны более детальные представления о структуре неопределенности и генезисе различных ее компонентов. Выделено семь основных источников неопределенности. Выявлены ограничения, которые присущи применяемым ныне методам квантификации алеаторной составляющей неопределенности и вносят вклад в эпистемическую составляющую. Выработанные представления позволяют, если не устранить, то существенно сгладить указанные ограничения, а также обосновать ряд способов регулирования эпистемической составляющей.

Объектом исследования является широкий спектр инженерных подходов к снижению неопределенности при проектировании: от существующих и применяемых на практике методов до перспективных концепций, находящихся в стадии разработки. Каждый из таких подходов дает возможность уточнить в той или иной мере априорные, опирающиеся на предшествующую статистику представления о поведении создаваемой системы при эксплуатации за счет получения и соответствующей обработки актуальной релевантной информации. Наиболее эффективной в этом отношении выступает концепция проектирования умной, проактивной, устойчивой технической системы (SPARS).

1 Введение

Проектирование сложной технической системы: воздушного, космического или аэрокосмического летательного аппарата (ЛА), атомной электростанции (АЭС), инфраструктурного объекта основывается на количественных оценках факторов, действующих при эксплуатации¹, и реакции системы на эти воздействия. Оценки воздействий опираются на знания, полученные с помощью прототипов создаваемой системы, предшествующих образцов и исследовательских экспериментов путем теоретического анализа и обобщения соответствующих данных. Реакцию системы оценивают посредством расчетов с использованием математических моделей и (или) испытаний физических объектов, отражающих в той или иной мере свойства системы. Но и при наличии подобного обоснования проектные решения принимаются в условиях неопределенности. Неопределенность занимает диапазон от стохастической вариации свойств системы и значений известных факторов до отсутствия знаний обо всех возможных воздействиях в процессе эксплуатации и поведении системы в непредвиденных ситуациях. К левой границе этого диапазона принадлежат часто происходящие и прогнозируемые события, укладываемые в категорию *алеаторной неопределенности*. Правая граница соответствует не известным при проектировании и потому не прогнозируемым неблагоприятным факторам, которые охватываются понятием *эпистемической неопределенности*. Между этими границами заключены воздействия известной природы с экстремальной, но неизвестной интенсивностью, крайне редкие сочетания случайных событий, способные вывести систему из строя, погрешности анализа поведения системы в плохо определенных условиях и прочие факторы, которые трудно оценить.

Недооценка опасных факторов в сочетании с ошибочными представлениями о способности ЛА, АЭС или иной большой и сложной системы противостоять им может привести к ее разрушению с высвобождением накопленной энергии и выбросом опасных технологических веществ, что угрожает жизни и здоровью людей, а также окружающей среде. В результате аварии, а тем более катастрофы, сама дорогостоящая техническая система может быть потеряна. Очевидно, что неопределенность, существующая на этапе проектирования системы и создающая подобную угрозу при эксплуатации, должна быть сведена к минимуму.

Необходимыми условиями для снижения неопределенности являются понимание ее природы, возможность количественной оценки (квантификации) и регулируемость. Цели минимизации служит разделение неопределенности на две составляющие, которые различаются по генезису и измеримости (Willett 1901), (Knight 1921):

- 1) объективная, или измеримая неопределенность, соответствующая концепции *риска*, и
- 2) субъективная, или неизмеримая составляющая, связанная с отсутствием представлений обо всех возможных исходах события или всех возможных событиях в рассматриваемом контексте.

Такое разделение отвечает указанной выше категоризации неопределенности как алеаторной или эпистемической.

¹ А в ряде случаев также при изготовлении элементов системы и ее строительстве.

В качестве меры алеаторной неопределенности, или риска какого-либо неблагоприятного события выступает его вероятность, тяжесть причиняемого этим событием вреда или их комбинация. Распространенным комбинированным показателем риска, который был предложен в начале XVIII века де Муавром, является произведение характеристики тяжести вреда, или величины потери, на вероятность потери (Bernstein 1996). Таким образом, для учета алеаторной неопределенности применяется подход, заключающийся в оценке вероятности события, относящегося к серии повторяющихся, на основе накопленных статистических данных. Но поскольку результатом проектирования должны быть четко определенные геометрические характеристики и физико-механические свойства элементов, составляющих систему, вероятностный подход реализуется, как правило, косвенно – через детерминированные коэффициенты безопасности, запаса или надежности². Значения этих коэффициентов устанавливают в зависимости от вариации параметров воздействий и свойств элементов, характеризующих сопротивляемость им, вида вероятностных распределений таких параметров и требуемых показателей безопасности или надежности – см. например, (Taylor 1965), (Макаревский и др. 1975), (Ржаницын 1978), (Гладкий 1982), (Спирочкин 2019). Благодаря контролируемому разбросу факторов, действующих в условиях стандартизованного массового производства и нормальной эксплуатации, статистической обоснованности законов распределений и консервативности значений указанных коэффициентов, зафиксированных в регулирующих документах, целевые показатели риска в современных проектах являются весьма низкими: они соответствуют вероятности аварии 10^{-6} и катастрофы 10^{-7} . Вопрос о том, насколько эти показатели реализуются в действительности, остается открытым – в том числе из-за недостаточной длительности опыта эксплуатации некоторых систем, например, АЭС (Spirochkin 2023).

Однако представления о будущем, основанные на прошлом опыте, пусть даже длительном, могут быть ошибочными, ибо потенциал индукции, с помощью которой они формируются, ограничен (Russel 1912). Ограничения вызываются эпистемической неопределенностью, присущей нашим знаниям о мире. За границами знаний остаются непредсказуемые неблагоприятные события, не охватываемые имеющимся опытом и статистикой. Для характеристики таких событий стала привычной метафора «черный лебедь» (Taleb 2007). Ее применяют ныне к любым неожиданным и масштабным катастрофам, включая ту, что произошла на АЭС «Фукусима Дайичи» в 2011 году. Под влиянием неожиданности и тяжести последствий подобных событий возникают сомнения в применимости вероятностного подхода и появляются предложения изменить опирающуюся на него парадигму проектирования (Dédale 2013). В связи с этим следует все же отметить, что подлинной причиной катастрофы на АЭС «Фукусима Дайичи» стала недооценка проектировщиками максимальной высоты волны цунами, исходя из *имеющихся* статистических данных. Поскольку явления цунами известны и повторяются, возможность их вероятностной оценки в принципе не вызывает сомнений. Проблема, обусловившая ту катастрофу, состояла в недостаточной консервативности сделанной оценки и неполной реализации в проекте принципа «защиты в глубину» (Spirochkin 2023).

² В различных отраслях техники используют разные термины, суть которых одна и та же.

Неопределенность, ассоциируемая с известными природными воздействиями, магнитуду которых трудно прогнозировать, является, скорее, алеаторной, а не эпистемической. Сам создатель образа «черного лебедя» в дальнейшем, хотя и не отказался от идеи непредсказуемости катастрофических событий, сфокусировался на исследовании «толстохвостых» вероятностных распределений, которые способны аппроксимировать статистические ряды, включающие экстремальные отклонения (Taleb 2020). Но при этом возникают вопросы: 1) если магнитуда внезапного единичного выброса резко отличается от масштаба прочих событий в ряду, то не свидетельствует ли это о вступлении в действие какого-то нового неизвестного фактора? и 2) можно ли считать такой ряд статистической совокупностью (неотъемлемое свойство которой состоит в качественной однородности событий)? Получение вероятностных характеристик базируется на обработке именно статистической совокупности, не говоря уже об мысленном образе генеральной совокупности, на фоне которого действует вероятностная методология. В этих вопросах, остающихся пока без ответа, проявляется несомненно влияние эпистемической неопределенности.

Распространение вероятностных методов на редкие неблагоприятные события, объем статистических данных по которым невелик, возможно на основе байесовского подхода. Он оперирует с субъективными оценками вероятностей, позволяя уточнять их по мере получения новых релевантных данных. Примером может служить соответствующий анализ террористической атаки на Всемирный торговый центр в Нью-Йорке в 2001 году (Silver 2012). Перспективы такого подхода к учету маргинальных проявлений человеческого фактора при проектировании (в контексте алеаторной неопределенности) затронуты в книге Spirochkin (2023). При его применении ко всему классу редких событий, способных оказать влияние на конфигурацию и свойства создаваемой технической системы, указанные выше вопросы приобретают еще большее значение, ибо эпистемическая неопределенность в случае скудной статистики и недостаточного понимания природы событий только возрастает.

По-видимому, наилучшая характеристика двух различных категорий неопределенности дана Дональдом Рамсфельдом: «... Есть известные неизвестные, то есть, мы знаем, что есть некоторые вещи, которые мы не знаем. Но еще существуют неизвестные неизвестные – нечто, о чем мы не знаем, что мы это не знаем»³. В своей книге он сформулировал представление об эпистемической неопределенности следующим образом: «Есть много вещей, о которых мы совершенно не подозреваем – фактически, есть вещи, о которых мы настолько не осведомлены, что даже не подозреваем, что не знаем о них» (Rumsfeld 2010).

С целью снижения субъективной, или эпистемической, неопределенности предпринимаются попытки ее структуризации. Одна из них состоит в выделении составляющей, ассоциируемой с известными исходами, но неизвестными вероятностями. Соответствующие идеи берут начало в социально-экономических исследованиях (Keynes 1937), (Stirling 2007), (Aven and Steen 2010)⁴, (Saunders et al. 2015), ныне они нашли место и в инженерных науках (Beer et al. 2016). Указанную составляющую можно отнести к

³ Дональд Рамсфельд (Donald Rumsfeld) произнес это в 2002 году, будучи министром обороны США, на брифинге для прессы в Пентагоне; цитируется по (Rumsfeld 2010).

⁴ Со ссылкой на статью Klauer and Brown (2003).

категории алеаторной неопределенности, если использовать для ее описания субъективные *неточные вероятности*, совместимые с общим вероятностным подходом и допускающие уточнение по Байесу. При этом сокращается поле эпистемической неопределенности, не поддающейся регулированию.

Когда можно сделать предположения относительно некоторых исходов, но все их множество неизвестно (как неизвестны и вероятности), и существуют лишь представления о его границах, в субъективной неопределенности выделяют еще одну составляющую. Ее характеристика является размытой: часть исследователей считает, что это *неоднозначность* (Lempert et al. 2003), (Stirling 2007), (Saunders et al. 2015), другие используют термины *фрагментарная или сомнительная информация, неточные переменные* (Beer et al. 2016). Эта составляющая, хотя и принадлежит в значительной мере к категории эпистемической неопределенности, отличается от полного незнания наличием некоторых логических построений – ограниченных и спорных, мнений – в том числе альтернативных, и оценок той или иной степени достоверности. Для ее учета применяют неоднозначные вероятности, нечеткие множества, интервальный анализ, анализ чувствительности и эвристические стратегии. В условиях конфликтующих альтернативных мнений, спорных и противоречащих друг другу оценок (иногда отражающих лишь специфические стороны человеческого фактора), снижение такой составляющей неопределенности достижимо за счет соответствующих методов управления проектной деятельностью.

В каждом из этих вариантов структуризации, как и в основной дихотомии неопределенности, существует эпистемическая составляющая в виде незнания, которой невозможно управлять в данных обстоятельствах. Она тесно переплетается с регулируемой алеаторной составляющей, и такая взаимосвязь осложняет задачу минимизации общей неопределенности в каждом конкретном проекте.

Представленный обзор существующих подходов к неопределенности показывает, что они основываются на ее понимании как комбинации двух главных составляющих: алеаторной и эпистемической, количественной оценке первой, представимой в виде риска, и возможностях ее снижения. Методы снижения риска при проектировании технических систем, опирающиеся на опыт эксплуатации, обеспечивают надежность и безопасность технологий в той мере, которую общество считает приемлемой. Постоянное накопление опыта, его теоретическое обобщение и трансформация в знания способствуют также снижению эпистемической неопределенности. Однако область действия технологий все время расширяется, в мире происходят неуправляемые изменения, и объем эпистемической неопределенности, по-видимому, не уменьшается. При больших изменениях условий работы созданной системы относительно предусмотренных в проекте (что можно ожидать в случае длительного жизненного цикла) особую важность приобретают такие свойства, как устойчивость к неожиданным неблагоприятным воздействиям и способность к последующему восстановлению. Понятно, что эти свойства реализуемы лишь в некоторых пределах: никакая система не может быть устойчивой к любым воздействиям или обладать безграничной восстанавливаемостью. Повышение надежности и безопасности технических систем с учетом трудно прогнозируемых событий, тем более в долгосрочной перспективе, возможно за счет расширения пределов

устойчивости и восстанавливаемости. Для этого необходимо совершенствовать подходы к неопределенности, включая способы обращения с ее эпистемической составляющей.

Целью этой статьи является:

- совершенствование представлений о неопределенности при проектировании технических систем: ее структуре и источниках различных компонентов, предполагая, что такой путь способен расширить возможности квантификации и регулирования неопределенности;
- анализ, исходя из найденных представлений, существующих подходов к снижению неопределенности и выявление их ограничений, осложняющих регулирование;
- исследование возможностей преодоления выявленных ограничений за счет новых проектных подходов, обещающих снижение эпистемической неопределенности.

2 Совершенствование представлений о неопределенности при проектировании

Как показано во Введении, существующие подходы к неопределенности при проектировании технических систем оставляют нерешенными проблемы управления риском при недостаточном объеме статистических данных и обоснования безопасности, когда возможны события, выходящие за пределы имеющегося опыта. Для обеспечения безопасности с учетом неизвестных факторов нужны более совершенные представления о неопределенности, которые помогли бы проектировщикам регулировать ее, снижая до минимального уровня.

Неопределенность при проектировании обуславливается следующими причинами (их можно назвать также источниками неопределенности):

- 1) стохастическим разбросом свойств элементов системы и параметров воздействий, из-за чего отсутствуют точные данные о свойствах каждого конкретного элемента и нагрузках на него – при этом априорные оценки состояния и поведения элемента при эксплуатации неизбежно сопровождаются погрешностями;
- 2) наличием в системе, включая контур управления, скрытых несовершенств (неудачных проектно-конструкторских решений, аномалий или дефектов⁵), а в эксплуатационной документации необнаруженных несоответствий (пробелов и неадекватных положений), способных проявиться неожиданно и привести к нарушению нормальной работы;
- 3) фундаментальной особенностью любой системы – возникновением у нее новых свойств после соединения элементов (при этом некоторые из возникающих свойств могут быть нежелательными и неочевидными до наступления специфических, заранее не известных обстоятельств);
- 4) возможностью неконтролируемых воздействий на систему и резкого изменения условий эксплуатации с выходом за установленные проектом пределы – вплоть до возникновения аварийной ситуации, когда дальнейшее состояние системы и ее поведение трудно непредсказуемы;

⁵ Дефект отличается от аномалии только регламентированными характеристиками: для того, чтобы считать аномалию дефектом, она должна принадлежать к известному, определенному типу несовершенств (например, макротрещина в конструкции), а ее количественные показатели должны быть не ниже установленных пределов.

- 5) не до конца понимаемым влиянием человеческого фактора в лице эксплуатационного персонала и других лиц, вовлеченных в жизненный цикл системы или находящихся в зоне ее работы;
- 6) погрешностями экспериментального и расчетного обоснования работоспособности и безопасности системы вследствие неполного подобия прототипов, исследовательских макетов и масштабных физических моделей свойствам создаваемой системы, ограниченности и неточности математических моделей, дефектов программных средств и неточности результатов симуляций;
- 7) возможностью действия на систему неизвестных факторов, что влечет за собой непредсказуемость ее состояния и реакции.

Первая из перечисленных причин охватывает множество трудно учитываемых влияний в условиях производства и нормальной эксплуатации системы. Практически целиком она соответствует алеаторной неопределенности. Обращение с такой неопределенностью при проектировании базируется на аппроксимации релевантных статистических данных и осуществляется как непосредственно вероятностными методами (в ряде случаев), так и с помощью детерминированных коэффициентов безопасности (преимущественно). Риск, связанный со стохастической вариацией свойств элементов системы и воздействий, снижают в основном за счет высокого качества конструкторских и производственных работ, соблюдения предписанных правил эксплуатации, выполнения эксплуатационного контроля, технического обслуживания и ремонта, а также своевременного вывода из эксплуатации.

Вероятностные методы пытаются распространить и на другие причины неопределенности. Так, их применяют для оценки наличия в системе скрытых несовершенств (вторая позиция в нашем перечне), которые остаются не выявленными при технологическом контроле, приемо-сдаточных и сертификационных испытаниях (Сухорученков и Огороков 2014). Возможность того, что не все неудачные проектно-конструкторские решения, аномалии и дефекты будут обнаружены до начала эксплуатации, связана с ограниченностью объема контроля или испытаний, техническими характеристиками применяемых инструментальных средств и негативным влиянием человеческого фактора в лице персонала, выполняющего соответствующие работы. Это влияние охватывает диапазон от неспособности проектировщиков предвидеть все многообразие потенциальных несовершенств и предотвратить их появление в системе до упущений контролеров и испытателей в части обнаружения имеющихся несовершенств. Подобным же образом человеческий фактор является «ответственным» за пробелы и неадекватные положения в процедурах использования системы. Как утверждают некоторые исследователи, «нет никаких средств для количественной оценки вероятности ... несоответствий в письменных материалах» (Swain and Guttman 1983). Таким образом, во втором источнике неопределенности проявляется эпистемическая составляющая.

Эта составляющая характеризует целиком третью причину неопределенности: возникновение у системы новых свойств. Наряду с планируемыми полезными качествами, при объединении элементов в систему (путем сборки, монтажа или других технологических операций) может быть получен побочный результат в виде возникающих нежелательных свойств. Последние иногда бывают неожиданными, становясь очевидными лишь в особых условиях эксплуатации, и для принципиально новой разработки их трудно предугадать. Примером возникающего нежелательного свойства

может служить способность механических соединений, работающих при высоких температурах, которые вызывают ползучесть, демонстрировать эффект *elastic follow-up*. Он возникает в случае разной жесткости соединяемых компонентов и состоит в вынужденном следовании более податливого компонента за упругой разгрузкой более жесткого, в результате чего в первом возникают деформации повышенных уровней. Влияние вынужденного следования на циклическую прочность соединения выражается в сокращении прогнозируемого срока службы по сравнению со значением, получаемым путем упругого расчета, не учитывающего этот эффект (RCC-MR 2007), (Jawad and Jetter 2009), (ASME 2010). После его обнаружения и объяснения природы существенное различие в жесткости соединяемых компонентов стало рассматриваться как маркер возможности возникновения у создаваемой конструкции нежелательного свойства. Очевидно, что для анализа подобных свойств вероятностные методы не применимы. Эти свойства определяют путем экспериментальных и теоретических исследований, проводимых на стадии проектирования. Нельзя исключать, что для любого из возникающих свойств может быть найден специфический маркер.

Возможность неконтролируемых природных и техногенных воздействий на систему и резких изменений условий эксплуатации, угрожающих выходом за проектные пределы (позиция 4 в перечне), иногда рассматривают в рамках статистики экстремальных значений (Gumbel 1962). Проблема состоит в том, что когда воздействия характеризуются распределениями по степенному закону, а резкие изменения отражаются лишь в толстых хвостах, для обеспечения робастности вероятностных оценок требуются статистические ряды, длина которых может выходить за рамки имеющегося опыта. С другой стороны, переменная, распределенная по степенному закону с показателем степени α , имеет определенное среднее значение только, если $\alpha > 2$, и конечную дисперсию, если $\alpha > 3$ (Newman 2005). Распределениям магнитуд землетрясений, как и интенсивности ряда других природных и социальных явлений, подчиняющихся степенному закону, свойственны значения показателя степени $2 < \alpha < 3$. Поэтому среди таких явлений могут возникать события типа «черный лебедь» (см. Введение), характеризующиеся непредсказуемым масштабом (и неизвестностью момента реализации). Следовательно, четвертый источник генерирует неопределенность со значительной и трудно устранимой эпистемической составляющей.

Для учета вариативности действий эксплуатационного персонала технической системы, относящейся к пятому источнику неопределенности, применяют вероятностные методы (Swain and Guttman 1983). Однако они плохо подходят для оценки влияния на безопасность других ролевых проявлений человеческого фактора, ассоциируемых с жизненным циклом проектируемой системы: публики, людей в транспортном средстве при крушении или людей в условиях злоумышленных действий (Spirachkin 2023). Присутствующую в таком влиянии эпистемическую неопределенность можно трактовать как неоднозначность (см. Введение). Ее анализ осуществим с помощью математического, в том числе агентного моделирования, но нынешний уровень развития этой методологии не позволяет решать все задачи обеспечения безопасности, особенно при рассмотрении массового поведения людей.

Природа неполного подобия средств экспериментального обоснования (прототипов, исследовательских макетов и масштабных физических моделей) свойствам создаваемой системы, как и природа погрешностей расчетного обоснования с помощью математических моделей и программных средств (шестая причина неопределенности), в целом не является стохастической. Однако источниками погрешностей в расчетах могут быть дефекты программных средств, обусловленные человеческим фактором в лице персонала разработки. Ограниченная вариативность, свойственная профессиональной деятельности, дает возможность использовать для оценки количественных показателей таких дефектов вероятностно-статистические подходы. В частности, применим метод захвата – повторного захвата, который позволяет приближенно определить размер совокупности дефектов и уровень их обнаружения по ряду независимых выборочных проверок (Schofield 2007). В итоге, неопределенность, соответствующую шестой позиции перечня источников, можно рассматривать как комбинацию небольшой алеаторной части с преобладающей эпистемической составляющей.

Седьмая причина в рассматриваемом нами перечне – возможность действия неизвестных факторов – целиком укладывается в категорию эпистемической неопределенности. Подобную возможность следует ожидать в первую очередь в исследовательских и инновационных проектах, затрагивающих новые или недостаточно разработанные области науки и технологий. О наличии неизвестных факторов свидетельствуют феномены, не объяснимые никакой теорией, и факты, противоречащие друг другу или не укладывающиеся в современную научную парадигму. К первым можно отнести квантовую запутанность; примером противоречиво объясняемых явлений является наблюдаемое (судя по значениям красного смещения и яркости экстремально удаленных сверхновых) ускоренное расширение Вселенной⁶.

При проектировании неизвестные факторы могут порождаться сложностью создаваемой системы, включая сложность процессов ее жизненного цикла. Под сложностью понимают специфическое свойство систем, в которых большое количество компонентов или подсистем, иногда различной природы, «объединяются, производя неожиданные возникающие явления, наблюдаемые в различных масштабах» (Hébert-Dufresne et al. 2024). В рассматриваемом контексте системой следует считать не только разрабатываемый технический объект, но и совокупность участников, инструментов и процессов его разработки (производительная система), а также комплекс, охватывающий, наряду с объектом, окружающую среду и процессы взаимодействия с ней на стадии эксплуатации (эксплуатационная система).

Сложность системы ассоциируется часто с нелинейностью ее свойств и взаимодействия с окружением. Нелинейность выражается в том, что параметры связи между элементами, установленные для какого-либо наблюдаемого интервала взаимодействия во временной или пространственной области, изменяются при переносе на любой другой интервал, и прежние значения становятся некорректными. В результате возникает недостаточная прослеживаемость и контролируемость всей системы.

⁶ Гипотеза расширяющейся Вселенной ныне подвергается серьезной критике.

Неопределенность, связанная с неизвестными факторами, в общем случае не устранима, однако применительно к каждому конкретному проекту ее можно снизить, используя экспериментальные и теоретические методы получения новых или более совершенных знаний. Необъяснимые феномены и противоречивые факты, сложность и нелинейность целесообразно рассматривать как маркеры действия неизвестных факторов или возможности их проявления в жизненном цикле системы.

Описанные представления о неопределенности при проектировании: источники и относительные доли генерируемых ими составляющих (алеаторная и эпистемическая) сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Уточненные представления о неопределенности при проектировании

Источник неопределенности	Относительные доли генерируемых составляющих неопределенности	
	Алеаторная	Эпистемическая
1. Стохастический разброс свойств элементов системы и параметров воздействий	В полном объеме	
2. Скрытые несовершенства в системе и эксплуатационной документации	Присутствует	Присутствует
3. Возникающие свойства		В полном объеме
4. Неконтролируемые воздействия и изменения условий эксплуатации	Присутствует	Присутствует
5. Влияние человеческого фактора	Присутствует	Присутствует
6. Погрешности экспериментального и расчетного обоснования	Присутствует	Преобладает
7. Неизвестные факторы		В полном объеме

Как видно из таблицы, лишь один из семи источников неопределенности при проектировании может быть целиком сопоставлен с алеаторной неопределенностью – это первый источник. Все остальные генерируют в той или иной мере эпистемическую неопределенность, а такие источники, как возникающие свойства и неизвестные факторы, она характеризует полностью. Эти особенности ограничивают возможности снижения неопределенности лишь с помощью вероятностных методов. Хотя уровень их развития весьма высок, область применимости вряд ли может быть расширена за пределы, установленные стохастической природой известных свойств и явлений. Внутри же этой «стохастической» области потенциал для дальнейшего снижения алеаторной неопределенности существует, и им не стоит пренебрегать. Реализация такого потенциала рассматривается ниже, в подразделах 3.1 и 3.2. Следует отметить, что границы «стохастической» области не являются четко определенными и сами могут быть предметом исследования. Все же главным фокусом нашего внимания и усилий по повышению безопасности проектируемых систем будем считать эпистемическую неопределенность. Существующие инженерные методы обращения с неопределенностью, позволяющие снизить степень незнания о создаваемой системе и ее поведении на стадии эксплуатации, анализируются в подразделах 3.3 и 3.4. Дальнейшие возможности, обеспечиваемые новыми проектными подходами, раскрываются в разделе 4.

3 Анализ существующих подходов к снижению неопределенности

3.1 Уточнение вероятностных характеристик

Снижению неопределенности при проектировании способствует уточнение вероятностных характеристик факторов, оказывающих влияние на параметры создаваемой системы и имеющих стохастическую природу. Такое уточнение особенно востребовано, когда система существенно отличается от прототипов по условиям эксплуатации (факторам окружающей среды, режимам работы, назначенному сроку службы), проектно-конструкторским решениям (конфигурации, размерам основных элементов и их соединениям), применяемым материалам и технологиям производства. В этом случае следует ожидать, что разбросы геометрических характеристик элементов, свойств материалов и соединений, а также параметров внешних воздействий могут выйти за рамки статистики, собранной для прототипов.

Уточнение достигается за счет получения новых экспериментальных данных в виде статистических рядов, характерных именно для создаваемой системы, и обработки этих данных с целью нахождения обоснованных распределений и других вероятностных характеристик. Они должны обеспечить меньшую погрешность оценок состояния и поведения проектируемой системы в прогнозируемых режимах эксплуатации. Таким образом, указанные действия направлены на снижение алеаторной неопределенности, генерируемой первым источником (см. таблицу 1).

Новые экспериментальные данные получают при испытаниях, входящих в категорию *экспериментов по исследованию явлений* (Oberkampff 2003). К ним относятся, в частности, испытания по определению свойств основных материалов и соединений, которые проводят в лабораторных условиях на образцах и элементах конструкций. Изготовление объектов экспериментов, собственно испытания и обработка их результатов могут быть одним из промежуточных этапов проектирования, который должен предшествовать принятию окончательных технических решений. С методами планирования механических испытаний и статистическими процедурами обработки можно ознакомиться в справочнике (Степнов 1985). Обнаружение повышенной по сравнению с прототипами вариации свойств может потребовать совершенствования технологических процессов, усиления элементов конструкций или увеличения коэффициентов безопасности.

Подобные же эксперименты являются источником данных о разбросах геометрических характеристик элементов и соединений. Основную долю в таких разбросах составляют начальные технологические несовершенства в виде утонения стенок, погиби, эксцентриситетов и других отклонений от проектных форм и размеров, которые часто сочетаются с остаточными напряжениями после различных операций обработки.

Статистические данные, характеризующие воздействия на новую систему в процессе эксплуатации, могут быть получены на исследовательских установках с помощью маломасштабных физических моделей или полноразмерных макетов, на опытных образцах системы, построенных перед началом ее серийного производства, а также на серийных экземплярах, снабженных средствами регистрации воздействий. Степень воспроизведения реальных процессов в исследовательских установках определяется соблюдением критериев подобия. Соответствующие эксперименты могут

проводиться на этапах проектирования, предшествующих принятию окончательных технических решений, и их главное преимущество состоит в обеспечении выбора и своевременного обоснования таких решений. Натурные эксперименты на опытных полноразмерных образцах системы не имеют ограничений в отношении подобию, но они являются, как правило, дорогостоящими и осуществимы лишь, когда проектирование системы уже закончено и началась стадия производства. Если по результатам этих экспериментов потребуется внести в систему какие-либо изменения, это может стать проблемой из-за дополнительных затрат и дефицита времени. Данные, регистрируемые при эксплуатации серийных экземпляров системы в течение длительного срока, представляют собой наиболее ценный информационный ресурс, в том числе, в отношении сравнительно редких природных воздействий, но его техническое обеспечение связано с затратами, а использование возможно в основном в будущем. Однако, поскольку параметры, характеризующие природные воздействия, обычно слабо зависят от свойств системы (прежде всего, в силу масштаба природных явлений), они могут быть получены с помощью подобных объектов, давно находящихся в эксплуатации (и играющих, таким образом, роль прототипов). Примером могут служить данные по атмосферной турбулентности, собираемые с помощью воздушных судов различных типов (Taylor 1965).

Контроль погрешности вероятностных оценок, получаемых описанными выше способами, обеспечивается посредством анализа их чувствительности к вариации объема статистической базы и виду закона распределения (если возможно применение распределений разных видов).

Наряду с несомненными достоинствами, изложенный подход имеет существенный недостаток: в его рамках определяются не фактическое состояние каждого элемента конкретной системы или фактические характеристики воздействий на нее, а параметры вероятностных аппроксимаций соответствующих статистических совокупностей. При этом оказывается возможным снизить неопределенность для всего парка однотипных систем и диапазона типовых условий их эксплуатации, вариация которых происходит в предсказуемых пределах, отвечающих разумным значениям вероятности. Однако нельзя гарантировать, что конкретная система обладает точно известными свойствами или она не подвергнется действию нагрузок, превосходящих вероятностные оценки, в течение срока службы.

3.2 Экспериментальное определение фактических свойств системы и воздействий

Фактические свойства конкретного экземпляра системы могут быть определены в экспериментах по проверке работоспособности (прочности, устойчивости к вибрационным и ударным воздействиям и т.п.). Такие эксперименты относятся к категории *системных и сертификационных испытаний* (Oberkampf 2003). Для определения фактических свойств служат также эксперименты по идентификации и уточнению математических моделей (в упомянутом выше отчете они названы *mathematical-model-development experiments* и *calibration (model-updating) experiments*). Получаемые при этом данные часто применимы для оценки характеристик, или свойств, реальной системы и вне диапазона непосредственных целей эксперимента. Например, результаты горизонтальных частотных испытаний советского космического челнока

«Буран» (частоты и формы колебаний конструкции, необходимые, прежде всего для обоснования безопасности с учетом аэроупругости и других видов динамических воздействий, а также для целей вибродиагностирования) использовались для обоснования математической модели, с помощью которой исследовалась его возможная аварийная посадка (Спирочкин 1987, 1993).

Фактические значения интенсивности воздействий и профили их изменения во времени можно определять в ходе экспериментов по исследованию явлений, упомянутых в подразделе 3.1. При моделировании аварийной посадки «Бурана» одной из проблем было определение силового воздействия на фюзеляж со стороны посадочной поверхности. Для случая посадки на грунт это воздействие рассчитывалось с использованием экспериментальных данных, накопленных при отработке приземлений советских космических аппаратов баллистического типа. С целью уточнения взаимодействия днища фюзеляжа «Бурана» с посадочной поверхностью в условиях скользящего удара со скоростью, характерной для посадки ЛА самолетного типа, была предложена специальная экспериментальная установка (Спирочкин 1988), а впоследствии на нее был получен патент (Патрушев и др. 1989).

Описанный подход устраняет указанный в подразделе 3.1 недостаток вероятностного оценивания: усреднение данных по множеству реализаций и может обеспечить снижение алеаторной неопределенности применительно к конкретному экземпляру системы (в пределах, относящихся, в основном к первому ее источнику, указанному в таблице 1). Однако он связан со значительными затратами на проведение экспериментов для каждого экземпляра, а полученные данные определяют лишь его начальные свойства, без учета их деградации в процессе эксплуатации системы.

3.3 Пилотные проекты

Инновационная деятельность, связанная с воплощением научно-технических идей в принципиально новых системах и их продвижением на рынок, может иметь высокий уровень эпистемической неопределенности. Для ее снижения используется концепция *пилотного проекта*. При реализации этой концепции не оцениваются ни вероятности различных исходов деятельности, ни какие-либо другие измеримые показатели, а эмпирически исследуется неопределенность как таковая. Пилотный проект может представлять собой этап большого долгосрочного проекта или масштабной программы. В процессе его выполнения собираются данные о неизвестных факторах, сопровождающих инновацию, и обосновывается ее техническая осуществимость и (или) коммерческая эффективность.

Существует ряд стратегий осуществления пилотных проектов. К ним относятся:

- 1) исследование пространства возможных исходов путем параллельного продвижения нескольких вариантов инновации (отдельными проектными командами) и определение наиболее успешного из них;
- 2) моделирование ключевых действий, характерных для внедрения разработанных идей или выпуска новой продукции, на небольшом представительном примере для выявления существующих проблем и поиска путей их решения;

- 3) ограничение объема инновации областью, соответствующей малому (приемлемому) риску, трактуемому как величина потенциальных потерь, извлечение уроков и определение корректирующих мер.

Первую стратегию использовало NASA в 1960-х годах при разработке лунного модуля. Ее применяли в первой половине 1990-х годов японские фирмы, производящие бытовую электронику. Аналогичным образом поступают многие автомобильные компании, которые разрабатывают несколько концепций для новой модели автомобиля, доводя их до прототипирования, чтобы наиболее полно изучить особенности сложной конструкции, прежде чем выбрать лучший прототип для производства (Pich et al. 2002).

Вторая стратегия знакома автору в связи с участием в 2006-2008 годах в научно-исследовательской программе, целью которой было внедрение технологий *информационной поддержки жизненного цикла* при проектировании ядерных реакторных установок транспортного типа. Сложность, новизна и степень ответственности этой программы обусловили необходимость пилотного проекта в виде конструкторских и расчетных работ по отдельной системе трубопроводов в составе конкретной установки, с обменом данными между этапами работ и выполняющими их подразделениями конструкторской организации.

Третья стратегия в значительной степени свойственна инновациям в области обороны и сдерживания (Cocron and Aronhime 2022). Она применима и при решении других актуальных проблем, имеющих высокий потенциал неопределенных опасностей, например, при внедрении искусственного интеллекта (ИИ) в авиационные системы (Spirochkin 2024).

Непосредственная «встреча с неопределенностью» при выполнении пилотного проекта обуславливает универсальность этой концепции. Благодаря универсальности могут быть исследованы такие источники неопределенности, как возникающие свойства (третий источник в таблице 1), погрешности экспериментального и расчетного обоснования (шестой источник) или неизвестные факторы (седьмой источник).

Кроме решения исследовательских задач, пилотные проекты могут способствовать также обучению организации (Turner 2005). При этом они могут сыграть определенную роль в выявлении скрытых несовершенств в создаваемых системах и эксплуатационной документации (второй источник неопределенности), а также в минимизации других негативных проявлений человеческого фактора (пятый источник). Таким образом, могут быть найдены и скорректированы, хотя бы отчасти, пробелы и неадекватные положения в процедурах использования системы, т.е. решена проблема, на которую указывают некоторые исследователи: «нет никаких средств для количественной оценки вероятности ... несоответствий в письменных материалах» (Swain and Guttman 1983).

3.4 Эксплуатационный мониторинг и диагностирование состояния

Вернемся к идее экспериментального определения фактических свойств каждого экземпляра серийно производимой системы и параметров воздействий, которая представлена в подразделе 3.2. В качестве ее недостатка было указано, что данные, полученные однократно при системных и сертификационных испытаниях перед вводом в эксплуатацию, не дают необходимых сведений о деградации свойств системы в течение

срока службы. Эта проблема решается в рамках концепции мониторинга и диагностирования ее состояния.

Мониторинг включает наблюдение, регистрацию и сбор данных, характеризующих текущее состояние отдельных элементов или системы в целом и текущие условия работы. Регистрация и сбор данных осуществляются с помощью сенсоров, размещенных в определенных местах системы, с установленной периодичностью во времени. Под диагностированием понимается анализ собираемых данных и оценка состояния элементов (системы) по критериям работоспособности с учетом возможных неисправностей. Данные, обеспечивающие такую оценку, представляют собой параметры реакции элементов (системы) на обычные эксплуатационные или специальные тестовые воздействия. Диагностирование проводится как периодически, вместе с процедурами мониторинга, так и после экстремальных событий, способных вызвать неблагоприятные изменения в состоянии системы. Оценка состояния основывается на непосредственно обнаруживаемых дефектах (видимые поломки, следы износа или коррозии, макротрещины и т.д.), а также на выявлении в поведении системы характерных признаков, свидетельствующих о скрытых неисправностях. В результате оценки текущего состояния могут быть выработаны рекомендации по устранению дефектов и неисправностей или осуществлению иных мер по управлению жизненным циклом системы.

Операции сбора и обработки данных выполняются в настоящее время с помощью автоматизированных комплексов мониторинга и диагностирования, являющихся, если система относится к категории особо ответственных, необходимой частью каждого ее экземпляра. Такими комплексами оснащаются, например, все создаваемые ныне ядерные реакторы. Входящие в их состав средства виброшумовой диагностики выделяют значимые признаки из шумов и вибраций, сопровождающих работу реактора, и идентифицируют их в качестве свидетельств об отклонениях от нормального состояния. Так, изменения в частотах и амплитудах вибраций внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР позволяют делать выводы (Аркадов и др. 2004):

- о снижении жесткостей элементов, прижимающих шахту реактора к корпусу;
- об аналогичных явлениях в пружинных блоках и дистанционирующих решетках тепловыделяющих сборок;
- об износе деталей (шпонок), посредством которых шахта контактирует с корпусом реактора в нижнем поясе их механической связи.

С другими возможностями автоматизированных комплексов мониторинга и диагностирования состояния элементов ядерных реакторов можно ознакомиться в книге Спирочкин (2019).

Разработка подобных комплексов является важной составляющей проектирования и иных сложных технических систем с длительным жизненным циклом. Она оформилась в отдельное научно-техническое направление: structural health monitoring (SHM). Его приложения к аэрокосмическим конструкциям регулируются, например, руководством SAE ARP6461A (2021). Однако пока нельзя говорить о широком практическом применении соответствующих технологий в этой области (Sause and Jasiūnienė 2021).

Благодаря мониторингу и диагностированию состояния на стадии эксплуатации обеспечивается снижение алеаторной неопределенности для каждого конкретного экземпляра системы и повышается уровень безопасности за счет знания текущего состояния и возможности уточненного прогнозирования будущего – в виде оценки остаточного срока службы (при ожидаемых условиях эксплуатации). Вместе с этим создается потенциал для повышения экономических показателей на основе *управления жизненным циклом системы по фактическому состоянию* вместо априори установленных и, как правило, избыточно консервативных планов соответствующих мероприятий.

Кроме того, эксплуатационный мониторинг и диагностирование состояния способствуют снижению эпистемической неопределенности, отвечающей второму источнику (скрытые несовершенства в системе и эксплуатационной документации). Важную роль играют при этом увеличение объема регистрируемых и анализируемых данных и повышение точности (разрешающей способности) применяемых инструментальных средств.

Следует также отметить влияние мониторинга и диагностирования на снижение неопределенности, связанной с возникающими свойствами (третий источник), неконтролируемыми воздействиями и изменением условий эксплуатации (четвертый источник), которые имели место за прошедший период эксплуатации, и в какой-то мере – с неизвестными факторами (седьмой источник).

Для описанного подхода свойственны некоторые проблемы. Они вызваны, прежде всего, ограниченностью области мониторинга и диагностирования относительно небольшим числом важных для безопасности элементов системы и регистрацией лишь ограниченного числа ключевых параметров. В противном случае существенно возрастают сложность и энергопотребление распределенной структуры автоматизированного комплекса, а также затрудняется его работа в реальном времени. Еще одной проблемой является стойкость компонентов комплекса (сенсоров, коммуникаций и блоков обработки данных) к неблагоприятным эксплуатационным факторам, которая должна сохраняться в течение всего срока службы. Последняя проблема особенно актуальна для ядерных энергетических установок и космических аппаратов, функционирующих длительное время без возможности ремонта или замены компонентов. В любом случае, регистрация физических процессов неизбежно сопровождается погрешностями, для оценки и снижения которых сигналы, поступающие от сенсоров, должны периодически подвергаться калибровке. Кроме того, прогноз будущего на основе данных, собранных в течение предшествующего интервала работы системы, может оказаться несостоятельным перед лицом внезапных неконтролируемых воздействий и изменения условий эксплуатации в последующий период. Наконец, принятие любых решений на основе данных мониторинга и диагностирования осуществляется оператором, а это значит, что из контура управления системой не исключен человеческий фактор с его возможными негативными проявлениями.

4 Перспективные подходы к снижению неопределенности

4.1 Выявление и анализ маркеров потенциальных источников эпистемической неопределенности

Как показано в разделе 2, в проектируемой системе и условиях ее будущей эксплуатации могут быть особенности, способные играть роль маркеров потенциальных источников эпистемической неопределенности. Излагаемый ниже подход направлен на выявление и анализ таких маркеров с целью идентификации источников и возможностей снижения неопределенности. Обоснование подхода строится на ретроспективе – рассмотрении некоторых ситуаций в прошлом, когда «неизвестные неизвестные», скрытые в проекте, неожиданно проявились при эксплуатации. Благодаря проведенным экспериментальным и теоретическим исследованиям они получили объяснение, перейдя, таким образом, в разряд «известных неизвестных». Суть предлагаемого подхода состоит в следующем: несмотря на то, что имеющиеся знания не позволяют предположить, какие неизвестные факторы (выходящие за пределы этих знаний), могут «всплыть» в новом проекте, ряд его особенностей способен указать на потенциал проявления чего-то неизвестного, и эти особенности подлежат превентивной корректировке.

Маркеры потенциальных источников эпистемической неопределенности могут быть выявлены путем специальных проверок массива информации, характеризующей проект. Первой из них является проверка на возникающие нежелательные свойства системы. Рассмотренный в разделе 2 эффект *elastic follow-up* является одним из подобных свойств – проявлением ползучести металлов при высоких температурах в зонах изменения непрерывности геометрических и (или) физико-механических характеристик конструкции и соответственно ее жесткости. Критерием значимости этого эффекта, когда ему следует уделять внимание, можно считать скачкообразное увеличение жесткости (или толщины) одного из соединяемых компонентов относительно другого не менее чем вдвое. Выполнение такого критерия в каком-либо соединении свидетельствует о неблагоприятном реологическом поведении в случае циклического нагружения. До установления причины этого поведения указанная конструктивная особенность служила маркером источника неопределенности циклической прочности соединения. В настоящее время количественная оценка эффекта *elastic follow-up* регламентирована в регулирующих документах – см., например (RCC-MR 2007) или (ASME 2010).

Нельзя исключать, что резкое изменение характеристик системы в соединениях ее компонентов может быть маркером источника и каких-то иных возникающих нежелательных свойств (третий источник в таблице 1). Для выявления и анализа подобных маркеров необходимы соответствующие исследования. Они могут составлять часть экспериментальных и теоретических работ по обоснованию проектных решений. Отметим, что специфические свойства систем и их возникновение являются предметом изучения специальной научно-технической дисциплины – системной инженерии (*systems engineering*), которая обладает развитым методическим аппаратом.

По-видимому, наиболее опасным возникающим свойством является *пороговый эффект*. Так называют скачкообразное изменение свойств системы или профиля процесса, происходящее при небольшом отклонении влияющего параметра от некоторого характерного значения. Результатом является существенное изменение текущей эксплуатационной ситуации. Пороговые эффекты способны приводить к необратимым

последствиям и препятствуют управлению системой. В атомной энергетике всякий пороговый эффект подлежит исключению на стадии проектирования АЭС как потенциальная причина ухудшения безопасности при эксплуатации (НП-001-15 2016).

Пороговые эффекты свойственны не только системам, полученным соединением ряда компонентов (элементов). Они проявляются и в более простых случаях, когда системой можно считать комбинацию какого-либо конструктивного элемента, окружающей его среды (граничных условий) и нагрузок. Продемонстрируем пороговый эффект на двух таких примерах.

В качестве первого рассмотрим потерю устойчивости элемента в виде тонкостенной цилиндрической оболочки под действием сжимающей нагрузки. На рисунке 1 показана диаграмма, представляющая зависимость между сжимающим усилием P , приложенным к торцу оболочки, и перемещением этого торца δ .

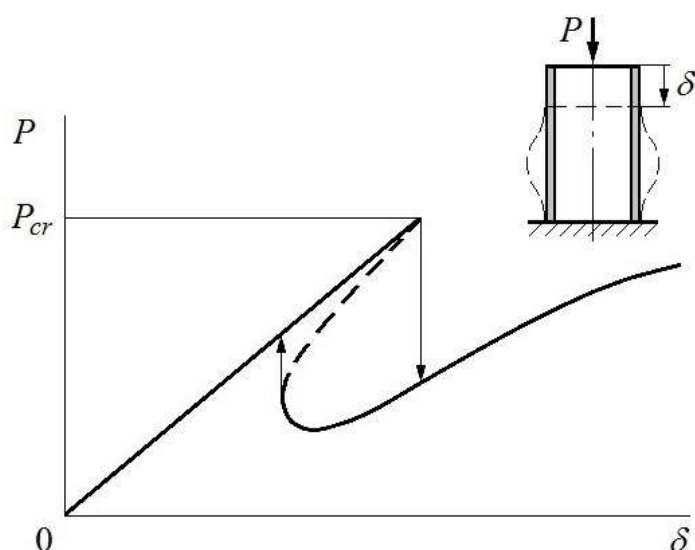


Рисунок 1 – Потеря устойчивости цилиндрической оболочки как один из примеров порогового эффекта

Вначале нарастание усилия сопровождается пропорциональным увеличением δ , и оболочка деформируется устойчивым образом. При достижении некоторого критического значения P_{cr} , характеризующего потерю устойчивости, пропорциональность между приложенным усилием и перемещением нарушается, происходит схлопывание оболочки с образованием волн выпучивания и перескок процесса деформирования на нижележащий участок кривой $P(\delta)$, что показывает соответствующая стрелка. В рамках математической теории, описывающей подобные явления, потеря устойчивости в виде схлопывания (и соответственно скачкообразная потеря несущей способности конструктивного элемента) рассматривается как катастрофа (Arnold 1992). Если при потере устойчивости не было пластических деформаций, то последующее уменьшение сжимающего усилия P и перемещения δ сначала соответствует нижней ветви кривой, а затем сопровождается обратным перескоком на вышележащий участок (стрелка вверх), при котором волны выпучивания исчезают. Возникновение пластических деформаций делает потерю несущей способности конструктивного элемента необратимой.

Неустойчивость с катастрофическими перескоками из одного состояния в другое, характерна также для колебаний в нелинейных системах. На рисунке 2 представлена амплитудно-частотная характеристика такой системы, демонстрирующая ее поведение при резонансе в условиях демпфирования.

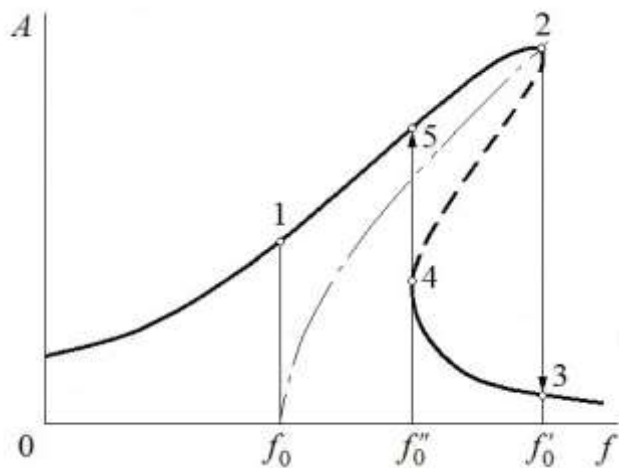


Рисунок 2 – Резонанс в нелинейной колебательной системе как еще один пример порогового эффекта

При медленном повышении частоты возбуждающего воздействия f в системе происходят вынужденные колебания с амплитудой A . Если бы система была линейной, то при приближении f к собственной частоте системы f_0 возник бы резонанс, т.е. резкое увеличение A . Однако нелинейная система проходит соответствующую точку 1 без резонанса. Он возникает при $f = f'_0$ ($f'_0 > f_0$), в точке 2, а затем система срывается режим колебаний с гораздо меньшей амплитудой, отвечающей нижней, более устойчивой ветви колебательного процесса – в точку 3. При движении в обратном направлении, т.е. медленном снижении частоты f и достижении значения f''_0 ($f_0 < f''_0 < f'_0$) в точке 4 происходит срыв в режим колебаний с большей амплитудой – в точку 5.

Когда точные свойства конструктивных элементов, в том числе критические нагрузки P_{cr} , собственные частоты f_0 , нелинейные амплитудно-частотные характеристики $A(f)$, частоты срыва f'_0 и f''_0 не известны (а эта ситуация типична для стадии проектирования), условия потери устойчивости, резонансы и амплитуды перемещений трудно прогнозировать. А эти данные могут быть критичными для обеспечения прочности, определения параметров систем управления и диагностирования. Именно поэтому проектировщики стараются выявлять пороговые эффекты известной природы заблаговременно и предотвращать их доступными способами.

Маркером потенциального порогового эффекта – как разновидности опасных возникающих свойств или источника неизвестных факторов (седьмой источник неопределенности в таблице 1) – можно считать сочетание следующих аспектов:

- 1) нелинейный характер уравнений, описывающих поведение системы (или ее элемента) в каком-либо режиме эксплуатации;
- 2) снабжение системы (элемента) энергией за счет рабочих процессов или взаимодействия с окружающей средой;

- 3) наличие пространства возможных состояний системы (элемента) с разными уровнями внутренней энергии – иногда это пространство характеризуется дополнительной размерностью, свободной от приложенных нагрузок, т.е. играющей роль ниши, способной поглотить избыточную внутреннюю энергию.

Следующей проверкой проектной информации может быть выявление и анализ необъяснимых феноменов и противоречивых фактов, присутствующих в данных о прототипах или предполагаемых условиях эксплуатации создаваемой системы, а также в результатах исследований, обосновывающих проект. Маркерами неопределенности в этом случае служат сами подобные феномены и факты – они свидетельствуют о наличии источника неопределенности в виде одного или нескольких неизвестных факторов (седьмой источник в таблице 1). Обнаружение таких маркеров обуславливает необходимость их анализа в рамках уже идущих экспериментальных и теоретических работ или проведение новых исследований с соответствующими целями и методологией.

Еще одной процедурой, способствующей выявлению потенциальных источников эпистемической неопределенности, является проверка на сложность. Ее следует проводить не только в отношении самой создаваемой технической системы, но и еще двух, ассоциированных с ней: производительной и эксплуатационной систем (см. раздел 2). Сложность любой из них может стать причиной проявления в процессах жизненного цикла неизвестных неблагоприятных факторов. Однако чтобы выступать в качестве маркера, сложность должна быть измеримым показателем, т.е. выражаться количественно. Мерой сложности системы можно считать объем ресурсов, необходимых для ее наблюдения, оценки состояния и управления. В качестве ресурсов могут рассматриваться трудоемкость соответствующих операций, разрешающая способность сенсоров и процессорных устройств, временные интервалы и мощность управляющих воздействий и т.д. Если располагаемых ресурсов достаточно, то система не создает особых сложностей для контроля даже в случае большого числа составляющих ее элементов. Если же объем ресурсов неадекватен задачам наблюдения, оценки состояния и управления, то система контролируема не в полной мере, и ее следует считать сложной. Таким образом, сложность зависит от научно-технического уровня, материального и организационного обеспечения проектирования и постпроектных стадий жизненного цикла.

Выше уже рассматривалась нелинейность как одно из условий, способствующих возникновению пороговых эффектов, ухудшающих контролируемость системы. Наиболее неблагоприятными являются следующие ее виды:

- 1) нелинейность с положительной кривизной, когда градиент функции, характеризующей поведение системы, например, ее реакцию R на управляющее воздействие X , увеличивается с ростом аргумента (рисунок 3a);
- 2) нелинейность релейного характера, когда функция, описывающая какое-либо свойство системы C в зависимости от пространственной или временной координаты θ , изменяется скачкообразно (рисунок 3b).

Целью проверки на нелинейность является обнаружение, прежде всего, таких видов нелинейности, способных генерировать эпистемическую неопределенность. Их маркерами выступают положительная кривизна и соответствующие изменения функций, характеризующих важные (в отношении производительности, экономичности или безопасности) свойства системы.

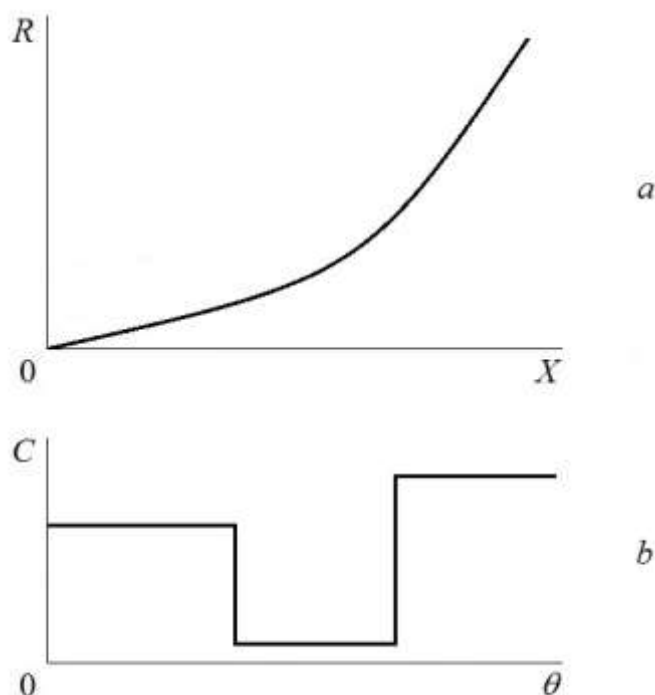


Рисунок 3 – Наиболее неблагоприятные виды нелинейностей: *a* – нелинейность с положительной кривизной; *b* – нелинейность релейного характера

Следует отметить, что второй вид нелинейности не только может порождать пороговый эффект, но и по своей форме подобен ему. Влияние нелинейности как источника неопределенности на контролируемость системы аналогично влиянию сложности. Таким образом, видимо, есть взаимосвязь между тремя неблагоприятными особенностями системы: потенциалом пороговых эффектов, сложностью и нелинейностью. Наличие у проектируемой системы таких особенностей при их соответствующих количественных показателях, т.е. наличие описанных выше маркеров, свидетельствует о возможных источниках неопределенности, указанных в таблице 1 под номерами 3 и 7.

4.2 Информационная поддержка жизненного цикла

При описании в подразделе 3.4 концепции эксплуатационного мониторинга и диагностирования состояния была упомянута возможность управления жизненным циклом технической системы по фактическому состоянию. Обеспечение этой возможности при создании системы означает важный сдвиг в парадигме проектирования. Очевидно, что априорные предположения о воздействиях на систему и деградации ее свойств в ходе эксплуатации, установленные в регулирующих документах или почерпнутые из справочных материалов и опирающиеся на предшествующую статистику, справедливы для каждого конкретного экземпляра лишь с некоторой погрешностью. Наличие такой погрешности генерирует неопределенность, которая может приводить либо к недостаточной экономической эффективности (из-за избыточного консерватизма регулирующих положений или излишней осторожности оценок по референциям), либо к дефициту безопасности (в случае редких экстремальных событий, не предусмотренных регулируемыми документами и отсутствующих в референциях). Излагаемый ниже подход исходит из принципа, что для снижения неопределенности каждый экземпляр

системы должен быть обеспечен, наряду с комплексом эксплуатационного мониторинга и диагностирования состояния, средствами информационной поддержки для текущего анализа процессов жизненного цикла. Эти средства должны обеспечивать:

- накопление данных обо всех воздействиях на систему и изменении состояния ее элементов в течение предшествующего периода работы и построение на их основе *фактической модели эксплуатации* (как альтернативы априорной *проектной модели эксплуатации*);
- оценку фактической поврежденности (исчерпанного ресурса) конструкции и других подверженных деградации элементов системы за этот период;
- прогнозирование дальнейшего безопасного интервала работы (остаточного ресурса) в предположении предсказуемости всех действующих факторов и соответствия их фактической модели эксплуатации.

Информационная поддержка дает возможность эксплуатирующей организации обосновывать решения по управлению жизненным циклом системы, включая следующие мероприятия:

- 1) продление срока службы при достаточном остаточном ресурсе всех элементов;
- 2) ремонт или замена элементов, выработавших свой ресурс, для сохранения работоспособности системы;
- 3) прекращение работы и вывод системы из эксплуатации при исчерпании ресурса ключевых элементов, которые нельзя отремонтировать или заменить;
- 4) перевод системы с исчерпанным по критериям нормальной эксплуатации ресурсом ключевых элементов в другой, более щадящий режим использования (в качестве объекта для обучения персонала, проведения исследований и т.д.).

Идея информационной поддержки происходит из концепции CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Supports), возникшей в военной авиации США в 1970-е годы, и ее первоначальной целью было сокращение логистических затрат при техническом обслуживании и ремонте воздушных судов. Постепенно концепция CALS проникла в другие отрасли техники, и ее фокусом стало снижение общих затрат на создание и сопровождение системы за счет обеспечения всех участников ее жизненного цикла единым источником данных с целью минимизации ошибок при их передаче между различными участниками и этапами. Носителями данных о системе являются информационные и математические (в том числе геометрические) модели. Они обрабатываются с помощью прикладных программных средств различных типов: CAE (Computer Aided Design), CAD (Computer Aided Engineering), CAM/CAPP (Computer Aided Manufacturing / Computer Aided Process Planning) и т.д.

Идея информационной поддержки привела к разработке соответствующей научно-технической и организационной концепции, которая получила наибольшее развитие, по-видимому, в российской атомной энергетике (Спирочкин и Европин 2008), (СПиР-О-2008), (Европин et al. 2009), (Спирочкин и Атрошенков 2009), (VERLIFE 2013), (ОТТ 1.5.2.01.999.0157-2013), (Спирочкин 2019). Важным аспектом исследований, в которых принимал участие автор, стало использование математических моделей элементов АЭС с учетом фактической геометрии и актуальных свойств, обновляемых периодически в соответствии с данными эксплуатационного мониторинга и диагностирования. Наличие таких моделей позволяет выйти за пределы ограниченного диапазона непосредственно

регистрируемых параметров и анализировать условия работы и состояние всего элемента, а также оценивать ключевые параметры ядерной энергетической установки в целом. Возникает потенциал для преодоления, по крайней мере, тех ограничений мониторинга и диагностирования, которые связаны со сложностью и энергопотреблением распределенной сети сенсоров и коммуникаций, а показатели сложности и энергопотребления возрастают вместе с требованиями повышения точности получаемых данных и скорости их обработки.

Преодоление указанных ограничений способствует дальнейшему снижению алеаторной неопределенности для каждого конкретного экземпляра системы (первый источник в таблице 1) и соответственно повышению безопасности. Кроме этого, информационная поддержка жизненного цикла способна значительно снизить эпистемическую неопределенность, связанную со вторым источником (скрытые несовершенства в системе и эксплуатационной документации). Как и в случае мониторинга и диагностирования состояния, отметим влияние информационной поддержки на снижение неопределенности, генерируемой третьим, четвертым и отчасти седьмым источниками (см. таблицу 1).

Вместе с этим остаются проблемы, связанные с участием в информационной поддержке человека (пятый источник неопределенности) – в лице персонала, обеспечивающего работу автоматизированной системы, инженеров-аналитиков и лиц, принимающих решения по управлению жизненным циклом. Кроме этого, не исключаются погрешности аналитической обработки, которые накладываются на погрешности регистрации физических процессов при мониторинге (шестой источник неопределенности).

4.3 Проектирование умной, проактивной, устойчивой системы (концепция SPARS)

Концепция проектирования умной, проактивной, устойчивой (в том числе способной к самовосстановлению) технической системы (Smart Pro-Active Resilient System – SPARS) базируется на очевидном положении, что при создании систем, предназначенных для длительной работы в условиях действия недостаточно известных факторов, полностью исключить неопределенность невозможно. Поэтому решение связанных с неопределенностью проблем безопасности и эффективности таких систем, особенно если они сложные и ответственные, следует искать на пути придания системе свойств, подобных свойствам биологических организмов, которые повышают возможности их выживания в опасной, трудно предсказуемой среде. К этим свойствам относятся: ощущение внутреннего состояния и окружающей обстановки, понимание возникающих угроз и готовность к ним, ситуативная реакция на любые, в том числе неожиданные, события и способность к компенсации ущерба от неблагоприятных воздействий (разумеется, в некотором диапазоне их интенсивности).

Исходя из перечисленных желаемых свойств, система, проектируемая по концепции SPARS, должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) «чувствовать» целостность своей конструкции, оценивать работоспособность составляющих ее элементов и делать вывод о безопасности внутреннего состояния;

- 2) «наблюдать» внешнюю среду, оценивать внешние факторы в сравнении с допустимыми (проектными) условиями и делать вывод о безопасности пребывания в этой среде;
- 3) оценивать возможную опасность изменений, происходящих снаружи и внутри, путем сопоставления изменяющихся воздействий на систему с потенциалом сопротивления им за счет фактических (также подверженных изменениям) свойств, и выбора приемлемого с точки зрения безопасности варианта реакции;
- 4) адекватно реагировать на наступление неблагоприятного события (кульминации указанных изменений), т.е. своевременно выполнять действия, направленные на минимизацию опасности, например, уклоняться от экстремальных внешних воздействий, если система мобильная и допускает это, или компенсировать их путем поглощения и рассеяния энергии;
- 5) оценивать в реальном времени процесс развития неблагоприятного события (имея в виду возможность аварии) и текущее внутреннее состояние по критериям безопасности; при дефиците безопасности предпринимать специальные меры по защите людей и сохранению работоспособности важных для безопасности элементов, включая локализацию и пассивирование факторов опасности, обеспечение эвакуации из зоны аварии, а также иные действия, предотвращающие перерастание аварии в катастрофу;
- 6) оценивать по критериям безопасности свое состояние и окружающую обстановку после неблагоприятного события; делать с учетом критериев эффективности выводы по управлению жизненным циклом применительно к дальнейшему его интервалу;
- 7) обладать возможностью восстановления (хотя бы частичного), если уклонение от экстремального внешнего воздействия или его компенсация в полной мере не удалась, и в системе возникли повреждения.

Проектирование согласно концепции SPARS основывается на некоторых уже применяемых на практике идеях и технологиях и развивает их. Так, первые два требования соответствуют направлению SHM, представленному в подразделе 3.4. Похожие свойства, а также отчасти позиции 4 – 6 приведенного выше перечня близки принципам интегрированного управления состоянием системы (Integrated System Health Management, ISHM) (Xu and Xu 2017) и интеллектуального управления состоянием и миссией (Intelligent Health and Mission Management, IHMM) (Ranasinghe et al. 2022). Требование 7 лежит в русле инженерии устойчивости и восстанавливаемости (resilient engineering).

Важным продвижением от уровня безопасности, достигаемого существующими подходами (см. Введение), к востребованным более высоким показателям можно считать свойство проактивности (позиция 3), а также совершенствование активных и реактивных свойств системы (позиции с 4-й по 6-ю). Эти свойства должны быть реализованы, учитывая большую скорость физических процессов, характерных для развития аварий, очевидно с использованием ИИ. Благоприятный исход в каждом таком случае может стать дополнительным практическим примером для обучения нейронной сети, реализующая ИИ, управлять критическими и аварийными ситуациями.

Описываемая концепция является своеобразным преломлением идеи бионического (биологически вдохновленного) проектирования. Существенную ее часть составляет формирование в процессе создания технической системы многоуровневой защиты, обеспечивающей:

- предотвращение критической ситуации, способной возникнуть вследствие одного или нескольких неблагоприятных событий, с угрозой перерасти в аварию;
- при невозможности предотвратить критическую ситуацию в условиях эксплуатации – управление ею с целью избежать аварии;
- если последнее оказывается невозможным, переход к управлению аварией с целью минимизировать потери и предотвратить возможную катастрофу;
- способность восстанавливаться после аварии, в том числе за счет заменяемых или ремонтируемых модулей.

К системам, имеющим подобную защиту, относятся АЭС. Защита должна противостоять возможной радиационной или ядерной аварии и включает пять уровней (НП-001-15), реализуемых как при проектировании, так и в процессе эксплуатации. Количество уровней защиты, которые являются независимыми и распространяются «в глубину», можно рассматривать как одну из непосредственных характеристик безопасности (Спирочкин 2019). Принцип многоуровневой защиты используется и в аэрокосмической технике, но значительная часть функций управления остается за оператором системы (пилотом, диспетчером или другими членами эксплуатационного персонала), из-за чего в процессе управления возможны негативные проявления человеческого фактора. Поэтому воздушные суда, космические и воздушно-космические летательные аппараты представляют собой перспективное поле для исследования и внедрения концепции SPARS – возможно, даже более широкое, чем ядерные энергетические установки. Исследования и разработки в этой области продолжаются в настоящее время, и их результаты, относящиеся к аэрокосмической технике, будут представлены в одной из следующих публикаций автора.

Проектирование технической системы по концепции SPARS способствует снижению неопределенности, генерируемой практически всеми ее источниками, указанными в таблице 1. В частности, оказывается возможным решить проблемы, связанные с влиянием человеческого фактора (пятый источник неопределенности), которые ограничивают потенциал информационной поддержки (см. подраздел 4.2). Развитие аналитических инструментов и технических средств ИИ, применяемых в рамках этой концепции, должно также оказать влияние на снижение неопределенности, вызываемой погрешностями экспериментального и расчетного обоснования (шестой источник).

Можно ожидать, что инновационные аспекты концепции SPARS окажутся сложны в реализации и (или) экономически невыгодны для серийно производимых систем – таких, например, как авиалайнеры, которые характеризуются сочетанием высоких уровней оптимизации, экономической эффективности и безопасности. Как правило, эти три показателя противоречат друг другу, и в действительности достигается лишь определенный компромисс между ними. Так, современные гражданские воздушные суда обладают весьма ограниченными возможностями по управлению авариями, в частности, обеспечению выживания людей, находящихся на борту, при крушении. В этом случае

приходится рассчитывать только на мастерство пилотов, поясные ремни и правильную «аварийную» позу (Спирочкин 2021). В целом, принятые в этой области «стандарты проектирования отвечают минимальным требованиям, а не отражают современный уровень защиты людей на борту, соответствующий передовым научно-техническим достижениям» (Shanahan 2004).

Весьма вероятно, что производители серийных систем, преследующие, прежде всего, экономические цели, не имеют достаточной мотивации, чтобы финансировать исследования и разработки, направленные на повышение безопасности сверх ныне принимаемого обществом уровня. Несомненно, что затраты на проектирование по концепции SPARS повысят стоимость создаваемой системы. Однако следует сопоставить их с потерями, которые могут возникнуть в случае непредсказуемого неблагоприятного события. Это особенно актуально для систем новых типов, полные испытания которых могут занять годы, но не дадут гарантии, что исследованы все потенциально опасные ситуации. Ввиду возможности неопределенных опасностей разумной стратегией проектирования следует считать ту, что увеличивает шансы на безопасный исход даже в непредвиденной ситуации. Именно такими качествами обладает концепция SPARS.

Заключение

Проведенное исследование проблемы неопределенности при проектировании технических систем позволяет заключить следующее:

1. В целях гарантированного обеспечения безопасности создаваемой системы имеющаяся неопределенность в отношении условий ее будущей работы, реакции на эксплуатационные воздействия и изменений внутреннего состояния должна быть сведена к минимуму.
2. Широко применяемые ныне методы учета и регулирования неопределенности на стадии проектирования опираются, в основном, на статистические данные из предшествующего опыта и консерватизм вероятностных или иных оценок. Из-за ограниченности опыта и трудно предсказуемых экстремальных событий подобные априорные представления о стадии эксплуатации могут содержать в себе значительную долю неопределенности, из-за чего безопасность не обеспечивается в полной мере.
3. В отраслях техники, важных в отношении безопасности и характерных инновациями, в дополнение к традиционным методам используют подходы, позволяющие скорректировать априорные представления и тем самым снизить неопределенность. К ним относятся: уточнение вероятностных оценок путем экспериментов на стадии проектирования, определение фактических свойств системы и воздействий на нее при постпроектных испытаниях, пилотные проекты, мониторинг и диагностирование состояния системы на стадии эксплуатации.
4. Наряду с этим приобретают все большее значение перспективные подходы, способные обеспечить дальнейшее снижение неопределенности за счет углубленного анализа проектной информации, ее актуализации в процессе эксплуатации и внедрения бионических принципов в сочетании с минимизацией негативного влияния человеческого фактора. Они включают: выявление и анализ маркеров потенциальных источников эпистемической неопределенности, информационную поддержку

жизненного цикла, проектирование умной, проактивной, устойчивой системы (концепция SPARS).

5. Каждый из представленных подходов обладает потенциалом для подавления одного или нескольких источников неопределенности, а их совокупность позволяет существенно снизить общую неопределенность. Реализация этих подходов несомненно связана с затратами, повышающими стоимость создаваемой системы. Однако такое повышение следует рассматривать как неизбежную плату за более совершенные представления о мире, полном непредсказуемости, и более безопасные технологии.

Библиография

- Arnold VI (1992) Catastrophe theory. 3rd ed. Berlin, Springer
- ASME (2010) 2010 ASME Boiler & Pressure Vessel Code. Section III. Rules for Construction of Nuclear Facility Components. Division 1, Subsection NH – Class 1 Components in Elevated Temperature Service. ASME, New York
- Aven T and Steen R (2010) The concept of ignorance in a risk assessment and risk management context. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(11):1117-1122
- Beer M, Ferson S and Kreinovich V (2016) Do we have compatible concepts of epistemic uncertainty? Departmental Technical Reports (CS). 1006. https://scholarworks.utep.edu/cs_techrep/1006. Accessed 2024-07-15
- Bernstein PL (1996) Against the gods: The remarkable story of risk. Wiley, New York
- Cocron A and Aronhime L (2022) Risk, uncertainty and innovation. *NATO Review*. Opinion, analysis and debate on security issues, 14 April 2022. <https://www.nato.int/docu/review/articles/2022/04/14/risk-uncertainty-and-innovation/index.html>. Accessed 2024-03-11
- Dédale JP (2013) Why a paradigm shift is needed. IAEA International Experts' Meeting on Human and Organizational Factors in Nuclear Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Vienna, Austria, May 21-24, 2013. Conference ID: 45441 (I2-CN-212). https://www-pub.iaea.org/iaeameetings/IEM5/IEM5_Jean%20Paries_Dedale_France.pdf. Accessed 2024-03-11
- Evropin SV, Obushev AE, Spirochkin YK, Petrenko AV (2009) Guidelines and dataware for life cycle management for NPP pipeline supports. *Proceedings of the 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20)*, Division 6. Design and Construction Issues, Paper 1774. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.20/23809>. Accessed 2024-05-06
- Gumbel E (1962) Statistics of extremes. Columbia University Press, New York
- Hébert-Dufresne L, Allard A, Garland J, Hobson EA and Zaman L (2024) npj Complexity 1(4). <https://doi.org/10.1038/s44260-024-00004-0>
- Jawad MH, Jetter RI (2009) Design and analysis of ASME boiler and pressure vessels components in the creep range. ASME Press, New York
- Keynes JM (1937) The general theory of employment. *The Quarterly Journal of Economics*, 51(2):209–223

- Klauer B, Brown JD (2004) Conceptualising imperfect knowledge in public decision-making: ignorance, uncertainty, error and risk situations. *Environmental research, engineering and management*, 1(27):124-128
- Knight FH (1921) *Risk, uncertainty and profit*. Houghton Mifflin Company, The Riverside Press Cambridge; Boston and New York
- Lempert RJ, Popper SW, Bankes SC (2003) *Shaping the next one hundred years: New methods for quantitative long term strategy analysis*, MR-1626-RPC. The RAND Pardee Centre, Santa Monica, California
- Newman MEJ (2005). Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. *Contemporary Physics* 46(5):323-351
- Oberkampf WL, Trucano TG, and Hirsch C (2003) Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics. Report SAND2003-3769. Albuquerque, New Mexico and Livermore, California
- Pich MT, Loch CH, De Meyer A (2002) On uncertainty, ambiguity, and complexity in project management. *Manag. Sci.* 48(8):1008–1023
- Ranasinghe K, Sabatini R, Gardi A, Bijjahalli S, Kapoor R, Fahey T, Thangavel K (2022) Advances in Integrated System Health Management for mission-essential and safety-critical aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 128, 100758
- RCC-MR (2007) *Design and Construction Rules for Mechanical Components of Nuclear Installations*. Section 1 – Nuclear Installation Components. AFSEN, Paris
- Rumsfeld D (2010) Known and unknown: Authors note. From pages XIII-XVI. The Rumsfeld Papers. December 2010. <https://papers.rumsfeld.com/about/page/authors-note>. Accessed 2024-03-11
- Russell B (1912) *The problems of philosophy*. Home University Library, 1912; Oxford University Press paperback, Oxford (UK), 1959
- SAE ARP6461A (2021) Guidelines for implementation of structural health monitoring on fixed wing aircraft. Rev. A. Aerospace Recommended Practice. SAE International
- Saunders FC, Gale AW, Sherry AH (2015) Conceptualising uncertainty in safety-critical projects: A practitioner perspective. *International Journal of Project Management*, 33(2):467-478
- Sause MGR, Jasiūnienė E (eds.) (2021) *Structural Health Monitoring damage detection systems for aerospace*. Springer (Series: Springer Aerospace Technology)
- Schofield J (2007) Beyond defect removal: Latent defect estimation with Capture-Recapture Method. *CrossTalk, The Journal of Defense Software Engineering*, 20(8):27-29
- Shanahan DF (2004) Human tolerance and crash survivability. In: RTO Educational Notes. EN-HFM-113. The Research and Technology Organization of NATO, 2005, pp 6–1, 6–16. Paper presented at the RTO HFM Lecture Series on “Pathological Aspects and Associated Biodynamics in Accident Investigation”, held in Madrid, Spain, 28–29 Oct 2004; Königsbrück, Germany, 2–3 Nov 2004
- Silver N (2012) *The signal and the noise. Why so many predictions fail – but some don't*. Random House, New York
- Spirochkin Y (2023) *Human factors and design*. Springer, Singapore

- Spirochkin Y (2024) What artificial intelligence brings to aviation: new opportunities or new risks? ResearchGate, 18.02.2024. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.19525.63203>. Accessed 2024-03-11.
- Stirling A (2007) Risk, precaution and science: towards a more constructive policy debate. Talking point on the precautionary principle, EMBO⁷ Rep 8, 309–315
- Swain AD, Guttman HE (1983) Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. NUREG/CR-1278. SAND80-0200. RX, AN. Final report. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM
- Taleb NN (2007) The Black Swan. The impact of the highly improbable. Random House, New York
- Taleb NN (2020) Statistical consequences of fat tails: Real world preasymptotics, epistemology, and applications (Technical Incerto Collection). STEM Academic Press
- Taylor J (1965) Manual on aircraft loads. Pergamon Press, Oxford; London
- Turner JR (2005) The role of pilot studies in reducing risk on projects and programmes. Int. J. Proj. Manag. 23(1):1–6
- VERLIFE (2013) Guidelines for integrity and lifetime assessment of components and piping in WWER nuclear power plants. IAEA, Vienna. Appendix F – Component and piping supports (Contributors: Obushev A, Spirochkin Y)
- Willett AH (1901) The economic theory of risk and insurance. The Columbia University Press (Reprint for the S. S. Huebner Foundation for Insurance Education, University of Pennsylvania, by Richard D. Irwin, Inc., Homewood, Illinois, 1951)
- Xu J, Xu L (eds) (2017) Integrated system health management. Academic Press

Источники на русском языке:

- Аркадов ГВ, Павелко ВИ, Усанов АИ (2004) Виброшумовая диагностика ВВЭР (Под ред. А.А. Абагына). Энергоатомиздат, Москва
- Гладкий ВФ (1982) Вероятностные методы проектирования конструкции летательного аппарата. Наука, Москва
- Макаревский АИ, Корчемкин НН, Француз ТА, Чижов ВМ (1975) Прочность самолета (методы нормирования расчетных условий прочности самолета). Под ред. акад. А.И. Макаревского. Машиностроение, Москва
- НП-001-15 (2016) Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва
- ОТТ 1.5.2.01.999.0157-2013 (2013) Опорные конструкции элементов атомных станций с водо-водяными энергетическими реакторами. Общие технические требования. ОАО Концерн Росэнергоатом, Москва (Авторы: Спирочкин Ю.К., Обушев А.Е., Филимонов С.В., Сорокин А.Н., Тараканов П.В. и др.). <https://meganorm.ru/Index2/1/4293736/4293736524.htm>. Доступ 2024-08-29
- Патрушев ВС, Плетнев ИВ, Спирочкин ЮК (1989) Авиационно-космический тренажер. Патент SU 1799479

⁷ European Molecular Biology Organization.

- Ржаницын АР (1978) Теория расчета строительных конструкций на надежность. Стройиздат, Москва
- Спирочкин ЮК (1987) Методика расчета динамического нагружения грузов при аварийной посадке летательного аппарата. Диссертация. НПО «Энергия», г. Калининград (ныне Королёв) Московской обл.
- Спирочкин ЮК (1988) Исходные данные на проведение экспериментальных исследований параметров реакции посадочной поверхности с использованием жестких макетов. Отчет П26478-017. НПО «Энергия», г. Калининград (ныне Королёв) Московской обл.
- Спирочкин ЮК (1993) Компьютерное моделирование динамики конструкций при авариях. Математическое моделирование, 5(6):85-103
- СПиР-О-2008 (2009) Свод Правил и Руководств по Опорным конструкциям элементов АЭС с ВВЭР. Стандарт организации. ООО «ИЦП МАЭ», Москва (Авторы: Европин С.В., Филатов В.М., Головлев Ю.Н., Обушев А.Е., Родченков Б.С., Спирочкин Ю.К. и др.)
- Спирочкин ЮК, Европин СВ (2008) Подходы к информационному сопровождению прочности ЯУ в течение жизненного цикла. Годовой отчет ФГУП НИКИЭТ - 2008: Сб. статей / Под ред. Е.О. Адамова, с. 120-121. НИКИЭТ, Москва
- Спирочкин ЮК, Атрошенко РС (2009) Применение ИПИ (CALS-технологий) в современной ядерной энергетике. Сб. лекций «Компьютерные технологии анализа инженерных задач механики: Лекции I Международной научной школы для молодежи, ИМАШ РАН, 9-13 ноября 2009 г., с. 36-42. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва
- Спирочкин ЮК (2019) Безопасность российских АЭС с точки зрения инженера-механика. СУПЕР Издательство, Санкт-Петербург
- Спирочкин ЮК (2021) Безопасность и экономичность – правильно ли выбран компромисс? AviaSafety.ru, 22.12.2021. <https://aviasafety.ru/39382>. Доступ 2024-08-29
- Степнов МН (1985) Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. Машиностроение, Москва
- Сухорученков БИ, Окороков МВ (2014) Оценки показателей возможных дефектов технических систем, не выявленных после отработочных испытаний. Двойные технологии, № 1(66), с. 12-18