

Design Problems and Knowledge Management

Electronic journal

Issue 6, July – August 2023

On the structure of uncertainty in the design

Yuri Spirochkin

Published: 03 August 2023

This article is dedicated to the problem of uncertainty in the design of complex technical systems: aircraft, spacecraft, nuclear power plants, etc. It continues the line started by the previous publication: On the problem of uncertainty in the design of technical systems (Design Problems and Knowledge Management, Issue 5, June 2023. <https://spirochkin.wixsite.com/info/journal>). One of the findings in the latter was that uncertainty is a phenomenon that has the property of heterogeneity, and in order to elaborate reasonable approaches to reducing uncertainty, it is advisable to identify its structure, i.e. to decompose this phenomenon into interrelated components that allow rationalization and processing.

The search for configuration, structural and functional parameters of the system under design is carried out in a space of factors that act during its operation and can have a significant impact on performance and safety. The article proposes a logical division of this space into regions with different degrees of uncertainty of factors, with the representation of the resulting structure in the form of a “core” corresponding to certain (known and determined) factors, and two surrounding “shells” in which factors characterized by uncertainty are “located”. The “shell” directly adjacent to the “core” is formed by known, but not quantitatively determined factors. Their uncertainty is divided into 7 categories, differing from each other in levels. When assigning these levels, sources of uncertainty and the possibility of reducing it in the design stage are taken into account. The outer “shell” is formed by unknown factors that are not determined either numerically or even nominally. To discover the possibilities of dealing with such marginal uncertainty, the reduction of which is hardly feasible during design, it is divided into 4 categories depending on the genesis of uncertainty, the availability of alternative ways to reduce risk, the potential of theoretical and experimental research aimed at more fully maintaining the functionality and safety of the systems which will be created in the future.

It is assumed that the materials of this article will form the basis for developing recommendations for taking into account the most difficult to understand and process aspects of uncertainty that were not previously taken into account in the design analysis.

О структуре неопределенности при проектировании

Ю.К. Спирочкин

Статья посвящена проблеме неопределенности при проектировании сложных технических систем: воздушных судов, космических аппаратов, ядерных энергетических установок и т.п. Она является продолжением предыдущей публикации (Spirochkin 2023b). Один из выводов последней состоял в том, что неопределенность – это феномен, которому свойственна неоднородность, и для выработки обоснованных подходов к снижению неопределенности целесообразно выявить ее структуру, т.е. разложить на взаимосвязанные составляющие, допускающие рационализацию и обработку.

Поиск конфигурации, конструктивных и функциональных параметров создаваемой системы происходит в пространстве факторов, действующих при ее эксплуатации и способных оказать существенное влияние на работоспособность и безопасность. В статье предлагается логическое разделение этого пространства на области с разной степенью неопределенности факторов, с представлением полученной структуры в виде «ядра», отвечающего определенным факторам, и двух окружающих его «оболочек», в которых «сосредоточены» факторы, характерные неопределенностью. «Оболочку», непосредственно прилегающую к «ядру», образуют известные, но количественно не определенные факторы. Их неопределенность подразделяется на 7 категорий, отличающихся друг от друга уровнями. При установлении этих уровней учитываются источники неопределенности и возможности ее снижения на этапе проектирования. Наружная «оболочка» сформирована неизвестными факторами, которые не определены ни в численном виде, ни даже номинально. Для выявления возможностей обращения со столь маргинальной неопределенностью, снижение которой при проектировании едва ли осуществимо, применяется разделение ее на 4 категории в зависимости от генезиса неопределенности, наличия альтернативных способов снижения риска, потенциала теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обеспечение функциональности и безопасности создаваемых систем в будущем.

Предполагается, что материалы данной статьи составят основу для выработки рекомендаций по учету наиболее сложных для понимания и обработки аспектов неопределенности, которые ранее не охватывались проектным анализом.

1. Пространство факторов и его разделение на области

Цель проектирования состоит в определении «архитектуры, составляющих частей, их взаимодействия и других характеристик системы или элемента системы» (ISO/IEC/IEEE 24765:2017). Процесс проектирования представляет собой, по сути, решение обратной задачи: на основе установленных требований к поведению системы в заданных условиях эксплуатации необходимо найти ее общий конструктивный облик и функциональную схему, форму и размеры каждой детали, а также физические и механические свойства применяемых материалов (Spirochkin 2023a). Эта задача является настолько сложной, что в строгом математическом виде она разрешима в настоящее время лишь для сравнительно простых случаев (относящихся к отдельным частям конструкции и узкому диапазону условий их работы). В основном проектирование осуществляется путем итераций с решением ряда прямых задач по определению реакции системы с известными (на данной итерации) параметрами на заданное эксплуатационное воздействие и проверкой критериев допустимости найденной реакции.

Любая проектная задача (как прямая, так и обратная) решается в пространстве факторов, действующих при эксплуатации создаваемой системы и способных оказать

существенное влияние на ее состояние и реакцию на воздействия, в силу чего эти факторы требуют учета. Они имеют разную степень неопределенности, происходящей из различных источников, а в самой неопределенности можно выделить субъективную и объективную части (Spirochkin 2023b). Вариативность и делимость неопределенности позволяют заключить, что пространство факторов с такими свойствами должно быть неоднородным, и, возможно, что в неоднородности можно выявить некую структуру. Опираясь на образное высказывание Дональда Рамсфельда об «известных» и «неизвестных» (Rumsfeld 2010)¹, разделим это пространство на три области, соответствующие:

- 1) известным определенным факторам,
- 2) известным неопределенным факторам и
- 3) неизвестным факторам.

Первая область образуется физическими факторами, отвечающими известным фундаментальным мировым силам: тяготению, электромагнитному, сильному и слабому взаимодействиям, а также связанным с ними свойствам пространства-времени, среди которых следует упомянуть размерность, пространственную изотропию, анизотропию времени, направленность изменения энтропии. На основе физических законов и констант, а также причинно-следственных отношений, описывающих проявления указанных факторов на Земле и в околоземном пространстве, построена вся современная техника.

Кроме этих факторов, к первой области можно отнести также заданные функции создаваемой системы и значения показателей, которым должен удовлетворять проект, включая требуемую производительность, экономичность и безопасность. При проектировании они известны и определены. В ядерной энергетике такую совокупность информации называют *проектные основы*. В аэрокосмической технике и других отраслях применяются понятия аналогичного содержания: *техническое задание*, *технические требования* или *спецификации*.

Известные определенные факторы являются координатами рассматриваемой области пространства: $\phi_1, \phi_2, \dots \phi_N$ (N – размерность области).

При формировании проектных основ (будем использовать этот термин) принимают во внимание возможные во время эксплуатации проектируемой системы природные и техногенные (антропогенные) события, которые известны на основе многолетнего опыта, накопленного в той или иной отрасли промышленности. Но часть событий может быть специфицирована лишь номинально, а количественные характеристики соответствующих внешних и внутренних воздействий на систему, например, действующие на конструкцию нагрузки (которые оказывают непосредственное влияние на искомые конструктивные параметры), остаются неопределенными и нуждаются в дополнительном обосновании. Неопределенными являются, например, нагрузки для случаев гидроупругого поведения элементов конструкции в потоке жидкости или газа, поскольку они зависят от сочетания параметров потока и механических свойств элемента, а эти данные до начала проектирования отсутствуют. Подобные события и воздействия будем квалифицировать как известные неопределенные факторы и отнесем их ко второй области пространства Φ .

Вторая область является расширением первой: известные определенные факторы продолжают в ней действовать, т.е. существуют ранее введенные координаты $\phi_1, \phi_2, \dots \phi_N$, но к ним добавляются новые специфические координаты, соответствующие известным неопределенным факторам: $\phi'_1, \phi'_2, \dots \phi'_{N'}$ (N' – число последних). Таким образом, результирующая размерность второй области пространства равна $N + N'$.

¹ Это высказывание воспроизведено в публикации Spirochkin (2023b).

Данная область пространства непосредственно «примыкает» к первой, и граница между двумя областями «проницаема». Кроме «прохождения» через границу координат $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N$, с течением времени, благодаря новым научным достижениям, неопределенность некоторых факторов из совокупности $\phi'_1, \phi'_2, \dots, \phi'_{N'}$ может снижаться до такой степени, что они становятся известными определенными, т.е. «перемещаются» в первую область. Более содержательно неопределенность, характерная для второй области, анализируется в разделе 2.

Основной и очевидной характеристикой третьей области пространства Φ , отвечающей неизвестным факторам, представляется априорное отсутствие какой-либо информации. Можно добавить следующие общие соображения:

- размерность этой области неизвестна, но, поскольку в ней сохраняется действие известных определенных факторов, результирующее число факторов должно, как минимум, превосходить N ;
- внешнюю границу области, как и ее размерность, установить невозможно, поэтому с соответствующей стороны область является открытой;
- с другой стороны третья область должна «примыкать» ко второй через проницаемую границу, поскольку по мере накопления новых знаний некоторые из неизвестных факторов могут переходить в разряд известных – скорее всего, неопределенных, т.е. «перемещаться» сквозь указанную границу во вторую область.

Однако третья область пространства Φ обладает и другими свойствами, которые не столь заметны при поверхностном взгляде – они рассматриваются в разделе 3.

С учетом указанных выше топологических особенностей пространство Φ можно представить себе в виде «ядра», соответствующего исключительно первой области, и двух окружающих его «оболочек»: роль внутренней оболочки играет вторая область, а наружной – третья область с неустановленной внешней границей. Пример такой топологии приведен на рисунке 1 для условного случая трехмерного пространства факторов ($N = N' = 3$): $\Phi(\phi_1, \phi_2, \phi_3)$.

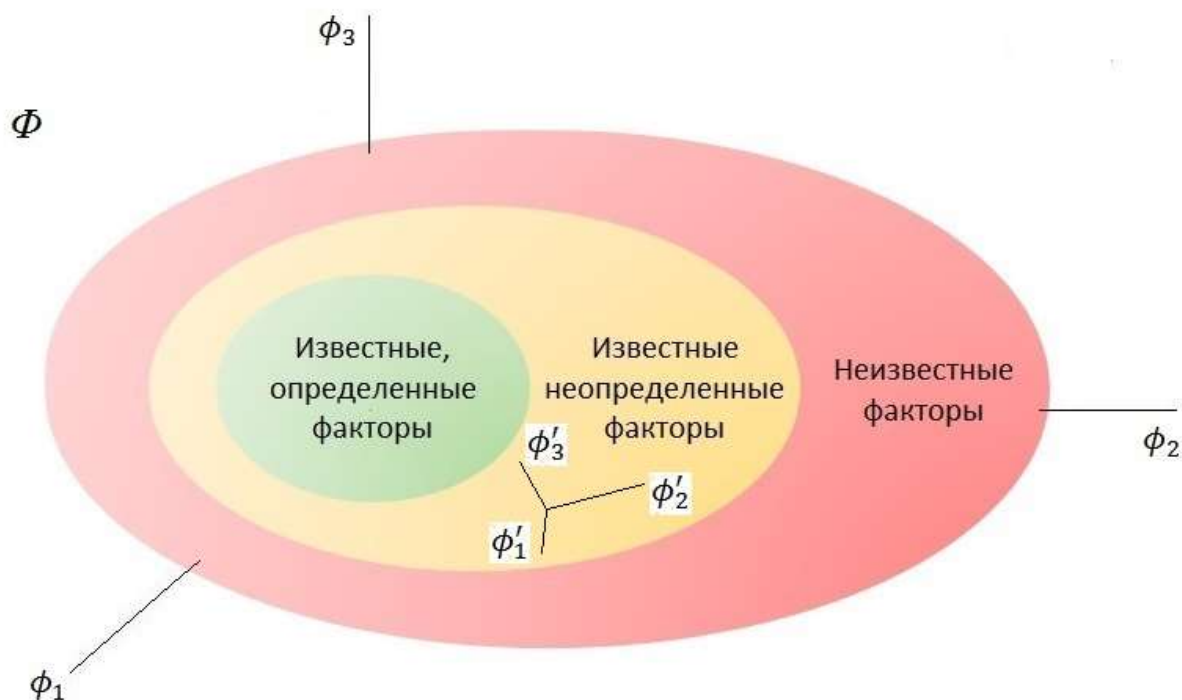


Рисунок 1 – Разделение пространства факторов на области в зависимости от степени неопределенности

2. Область известных неопределенных факторов

Неопределенность факторов, формирующих вторую область пространства Φ , обладает, как и рассматриваемое пространство в целом, свойством неоднородности – и по источникам неопределенности, и по возможностям обращения с ней. С целью учета этой неоднородности введем градацию неопределенности на ряд категорий. В частности, упомянутая в разделе 1 неопределенность нагрузок при явлениях гидроупругости в потоке жидкости или газа обусловлена связанностью движений элемента и обтекающей его среды, а характеристики движения (профиль изменения перемещений во времени, частоты и амплитуды автоколебаний) зависят как от параметров потока, так и от искоемых конструктивных параметров. Такая неопределенность может быть исключена путем решения уравнений, описывающих связанное движение, с использованием исходных данных, отвечающих текущему состоянию проекта. В процессе решения значения нагрузок находят вместе с параметрами движения элемента и среды.

Подобная неопределенность возникает во всех проектных задачах нелинейного характера, когда реакция создаваемой конструкции зависит от искоемых конструктивных параметров, из-за чего требования по ограничению реакции или требования к несущей способности конструкции не могут быть установлены заранее в количественном виде. Для идентификации соответствующей неопределенности применима категория: *неопределенность номинально специфицированных факторов*. Эта неопределенность в большинстве случаев устранима путем проектных расчетов.

Возможна неопределенность известных факторов иного рода. Например, для атомных электростанций (АЭС) и других ядерных установок известными являются природные события, определяющие требования к их прочности и безопасности: землетрясения, цунами, ветровые воздействия и пр. Перечни самих событий и действующих факторов, а также положения по их учету при проектировании содержатся в регулирующих документах всех стран, разрабатывающих объекты использования атомной энергии; они обобщены в стандартах и руководствах МАГАТЭ (IAEA 2021a, IAEA 2021b, IAEA 2022). Такие события имеют случайный характер; месту, времени и интенсивности потенциальных воздействий свойственна неопределенность. Проектные основы ядерных установок обычно содержат количественные характеристики интенсивности природных воздействий, которым установки должны противостоять. Эти характеристики основываются на вероятностной аппроксимации статистической информации, полученной в определенном географическом регионе (соответствующем месту расположения установки) за длительный период наблюдений. Однако, как показывают современные исследования, интенсивность большинства природных факторов подчиняется степенному закону распределения, и для них нельзя указать конечную дисперсию (Newman 2005)². Поэтому любые значения, ограничивающие интенсивность, являются не только условными (отвечающими некоторой вероятности непревышения), но и с математической точки зрения некорректными. Следствием является возможность событий типа «черный лебедь» (Taleb 2007), ущерб от которых непредсказуем³. Опасность ограничения интенсивности природных воздействий продемонстрировала авария на АЭС «Фукусима Дайичи». В статистических данных по высоте волн цунами, собранных за период около 100 лет, которые использовались проектировщиками этой АЭС, не были учтены весьма редкие экстремальные значения, а именно такая волна обрушилась на нее 11 марта 2011 года и привела к разрушению ядерных реакторов (Spirochkin 2023a). В отношении

² Эта особенность упомянута в публикации Spirochkin (2023b).

³ См. там же.

количественных характеристик интенсивности подобных факторов мы имеем дело с категорией: *неопределенность ограничения вероятностно-статистических значений*, и эта неопределенность при существующем уровне знаний неустранима.

Неопределенность свойственна и факторам, действующим при техногенных случайных событиях – авариях, которые обычно включают в проектные основы создаваемых технических систем. К таким событиям относятся: падения самолетов на объекты инфраструктуры, ударные волны от взрывов, удары и столкновения (последним подвержены, в частности, транспортные средства) и т.д. Но эта неопределенность отличается от предыдущей категории, поскольку не для всех возможных техногенных событий имеется статистическая информация, и могут быть получены вероятностные характеристики. Например, в мире не зафиксировано пока ни одной авиакатастрофы в районе АЭС. Тем не менее, падение самолета на объект использования атомной энергии рассматривается как расчетный случай при проектировании защитного сооружения; для него регламентированы сценарии и определены подходы к анализу прочности (IAEA 2021b). Подобные сценарии и подходы выработаны и для других типов учитываемых аварий. При проектном анализе аварийных ситуаций, специфицированных без обоснования опытом, проектировщики используют предположения и математические модели, которые не проверены на практике и поэтому не могут считаться вполне достоверными. Таким образом, имеет место *неопределенность априорных данных*. В принципе она поддается регулированию (снижению) за счет экспериментальной проверки теоретических положений и верификации расчетных кодов, реализующих математические модели. Но натурные эксперименты, особенно с потенциально опасными и (или) дорогостоящими объектами, не всегда осуществимы, а замена их испытаниями с использованием маломасштабных физических моделей ограничена возможностями соблюдения подобия (Spirochkin 2023a). В результате не только сохраняется некоторая доля указанной неопределенности, но и создается новая категория: *неопределенность погрешностей экспериментального обоснования*. Возможности теоретически корректной верификации численных моделей (расчетных кодов) ограничены, как правило, линейными консервативными задачами (Spirochkin 2023a). Аварии же часто сопровождаются нелинейными процессами, которые связаны с разрушениями и сопровождаются рассеянием энергии. Оценки точности таких расчетов не являются строгими и достаточно надежными, поэтому имеет место *неопределенность погрешностей математического моделирования*. Снижение неопределенности той или другой категории возможно за счет совершенствования экспериментальных и теоретических методов, но в полной мере устранить ее на этапе проектирования нельзя.

Для воздушных и наземных транспортных средств неопределенность априорных данных об авариях в виде столкновений регулируется в значительной степени. Ее снижению способствует накопление статистики по реальным происшествиям и данных исследовательских и сертификационных испытаний, проводимых с полномасштабными изделиями. В авиационной и космической технике, наряду с проектными мероприятиями, базирующимися на таких данных, используется реагирование на опасность столкновений в реальном времени. Реагирование состоит, в основном, в выполнении маневров, чтобы избежать столкновения. В авиации этой цели служат бортовые системы типа TCAS⁴ и TAWS⁵. В космонавтике существует дополнительная опасность из-за ударов метеороидов и

⁴ Traffic Collision Avoidance System – система предупреждения столкновений в воздухе, см., например, (FAA 2011), (ACAS Guide 2017), а также (Spirochkin 2023a).

⁵ Terrain Awareness and Warning System – система предупреждения о близости земли, см., например, (FAA-H-8083-6 2021), (Spirochkin 2023a).

столкновений с космическим «мусором». С учетом соответствующих рисков проводится наблюдение за объектами в околоземном пространстве, их идентификация и маневрирование (Cavallaro 2019). Такое управление неопределенностью осуществляется на этапе эксплуатации, а сами средства наблюдения, идентификации опасности и реагирования предусматривают в создаваемой системе при ее проектировании (в том числе как готовые внедряемые элементы). Как и в предыдущем случае, вместе с регулированием «неопределенности априорных данных» возникает новая категория: *неопределенность погрешностей реагирования*. Источники этих погрешностей кроются в несовершенстве программных и аппаратных средств, а также исполнительных устройств, т.е. в отличии реального результата от замысла, и соответствующая неопределенность устранима на этапе проектирования лишь частично.

Развивая положение о несовершенстве в реализации замысла, следует отметить, что значительную часть известных неопределенных факторов составляют отклонения геометрических, механических и иных свойств элементов системы от номинальных проектных значений. Они возникают как при производстве (начальные технологические дефекты), так и в процессе эксплуатации (дефекты вследствие старения, износа, коррозии и иных форм деградации элементов системы). Неопределенность фактических свойств каждого конкретного элемента и как следствие экземпляра системы в целом в какой-либо постпроектный момент жизненного цикла обуславливается множеством различных воздействий, которые сложно учесть. Она имеет характер стохастического процесса с некоторым временным трендом средних значений и вариацией относительно тренда. При проектировании эта неопределенность учитывается с помощью математических, в том числе вероятностных моделей, аппроксимирующих результаты исследований, проведенных на лабораторных физических моделях, прототипах и образцах. Неопределенность увеличивается, когда геометрия и материал элементов, а также условия производства и эксплуатации проектируемой системы отличаются от прототипов или образцов. Для характеристики итоговой неопределенности такого рода подходит ранее введенная категория «неопределенность априорных данных». Поскольку для изготовленного изделия существует, по крайней мере, принципиально, возможность идентификации его свойств, то эта неопределенность, не устранимая в полной мере при проектировании, допускает компенсацию за счет эксплуатационного мониторинга, т.е. она регулируется на постпроектных этапах жизненного цикла.

Действие ряда известных неопределенных факторов распространяется и на т.н. *запроектные аварии*⁶ – события, выходящие за пределы проектных основ. Ни сценарии их развития, ни параметры реализуемых воздействий не регламентируются нормативными документами. Они устанавливаются в каждом конкретном случае, когда для создаваемой системы требуется выявить «запасы безопасности» при превышении уровней воздействий, учитываемых в проекте, и идентифицировать возможные *пороговые эффекты*⁷. Запроектные аварии могут быть результатом сочетания редких событий; такие сочетания являются крайне маловероятными, и их не включают в «обычный» проектный анализ. Возникающая при этом неопределенность сопоставима с категорией: «неопределенность априорных данных». Однако запроектные аварии, сопровождаемые нелинейными механическими процессами и функциональными отказами элементов, могут развиваться

⁶ Термин, принятый в атомной энергетике.

⁷ Пороговым эффектом называют скачкообразное изменение свойств системы или профиля процесса, происходящее при небольшом отклонении параметра, способного оказать такое влияние, от заданного значения. Результатом является существенное изменение текущей эксплуатационной ситуации. В атомной энергетике всякий пороговый эффект подлежит исключению как потенциальная причина ухудшения безопасности при эксплуатации АЭС.

по непредсказуемому пути, который реализуется при неожиданной комбинации их свойств в условиях стохастической вариации. Для факторов, действующих в таких ситуациях и подлежащих анализу на этапе проектирования, целесообразно ввести еще одну категорию неопределенности: *неопределенность развития ситуации*. Подобная неопределенность, очевидно, допускает регулирование за счет теоретических и экспериментальных исследований поведения сложных, насыщенных энергией систем при серьезных авариях, но вряд ли при проектировании конкретной системы она устранима полностью.

Структуре неоднородности, выявленной у неопределенности во второй области пространства Φ , можно дать наглядную графическую интерпретацию. На рисунке 2 представлена диаграмма, на горизонтальной оси которой расположены указанные выше категории в виде столбцов⁸, а высота каждого столбца соответствует условному ранжированию уровней неопределенности с учетом возможности ее снижения. Применяется следующее ранжирование: самый низкий уровень придается неопределенности, устранимой путем расчетов, а самый высокий – неустраимой. Такие характеристики неопределенности, как «частично устранимая», «не устранимая в полной мере» и т.п., отображаются посредством промежуточных уровней (соотношение которых в данном контексте не играет роли).

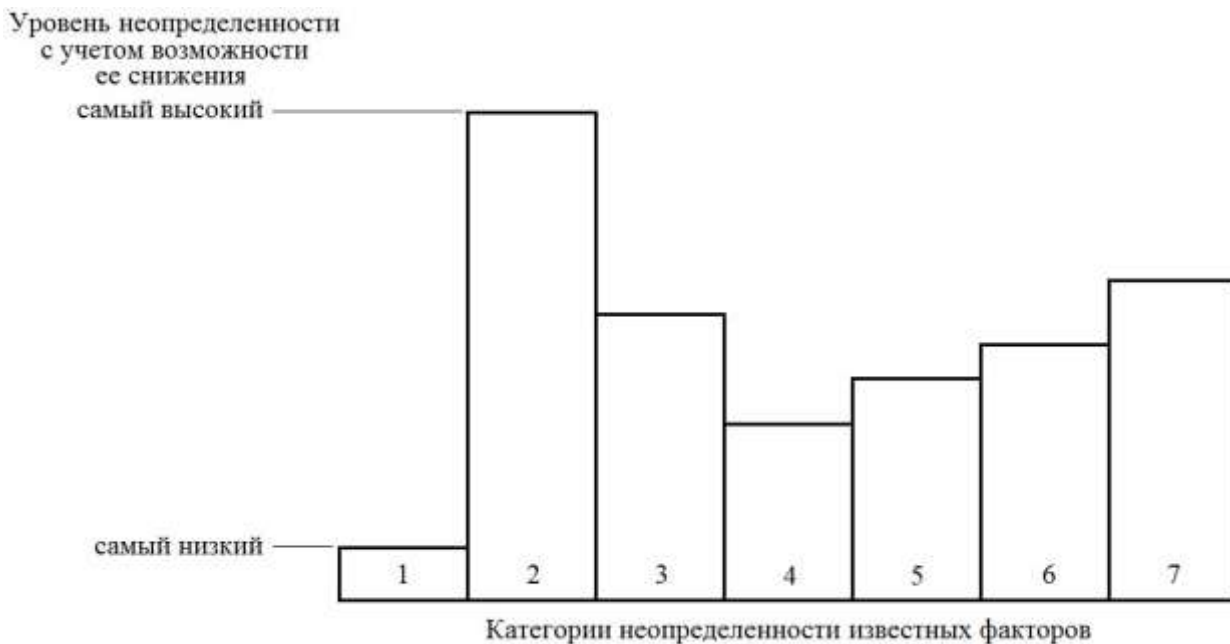


Рисунок 2 – Неоднородность неопределенности во второй области пространства факторов
 (1 – неопределенность номинально специфицированных факторов;
 2 – неопределенность ограничения вероятностно-статистических значений;
 3 – неопределенность априорных данных;
 4 – неопределенность погрешностей экспериментального обоснования;
 5 – неопределенность погрешностей математического моделирования;
 6 – неопределенность погрешностей реагирования;
 7 – неопределенность развития ситуации)

⁸ Порядок их взаимного расположения не имеет значения; в данном случае он отвечает очередности первого упоминания категории в тексте.

3. Область неизвестных факторов

В разделе 1 была дана общая характеристика третьей области пространства Φ , в которой «сосредоточены» неизвестные факторы. К ним относятся физические проявления неизвестных событий, способные оказать неблагоприятное влияние на работоспособность и безопасность проектируемой системы. События, которые никогда не происходили в прошлом, трудно, если вообще возможно, вообразить в будущем. Тем не менее, риски, связанные с трудно вообразимыми событиями, представляют несомненный интерес для проектировщиков систем, которые должны функционировать в любых условиях, быть «не убиваемыми» и не создавать угроз для людей, вовлеченных в их эксплуатацию или находящихся в области их работы (если эта работа не состоит в боевом назначении). Казалось бы, неизвестность того, что может произойти, является непреодолимой преградой для формирования и анализа проектных решений, обеспечивающих эффективное и безопасное функционирование. Предположим, однако, что ситуация не безнадежна. Для поиска подходов к ее разрешению попытаемся прояснить некоторые характерные особенности маргинальной неопределенности.

Особенностью, которую разумно ожидать по аналогии со свойствами второй области пространства Φ , представляется неоднородность: неопределенность неизвестных факторов может иметь составляющие различного генезиса с разными способами обращения с ними. Исходя из этого предположения, выделим в неопределенности ряд таких составляющих, или категорий.

Первую идентифицируемую категорию составляет неопределенность, обусловленная неполными знаниями обо всех возможных условиях работы создаваемой системы и неблагоприятных событиях, возможных в столь широком диапазоне, которые могут сопровождаться неизвестными экстремальными воздействиями. Очевидно, что такая *неопределенность из-за неполноты прикладных (технических) знаний* практически не поддается снижению на этапе проектирования системы. Она может быть уменьшена в последующий период за счет накопления соответствующих данных при эксплуатации систем подобного типа и их трансформации в знания. По этому пути развивается, фактически, вся техническая цивилизация, и актуальный вопрос заключается в том, возможно ли получение знаний, опережающих опыт, чтобы быть в состоянии предсказать небывалые (и поэтому трудно вообразимые) аварии и катастрофы? Уточним этот вопрос следующим образом: является ли источником знаний только практика или возможно получить их с помощью логических выводов и теоретических моделей? Удивительный образец прозрения, не опиравшегося на опыт и подтвержденного экспериментально лишь спустя две с лишним тысячи лет, дает идея атомного строения вещества, авторство которой принадлежит философам Древней Греции: Левкиппу, Демокриту и Эпикуру⁹.

Предполагая, что при эксплуатации системы могут произойти трудно вообразимые неблагоприятные события, и в условиях, когда неопределенность рассматриваемой категории нельзя снизить, в целях безопасности прибегают к альтернативным способам обращения с неопределенностью, которые фокусируют внимание не на ней, а на потенциальных потерях. Первый из способов такого рода предусматривает минимизацию потерь, т.е. в конечном итоге снижение риска, независимо от уровня неопределенности. Он используется в инновационном бизнесе, в том числе, в области обороны и сдерживания (Cocron and Aronhime 2022)¹⁰. Применительно к проектированию этот способ включает разработку и испытания одного или нескольких пилотных

⁹ Согласно традиционной исторической науке и истории философии.

¹⁰ Соответствующий подход упомянут в публикации Spirochkin (2023b).

(экспериментальных) образцов системы, оснащенных средствами мониторинга условий эксплуатации и технического состояния, а также мероприятия по идентификации и исследованию неизвестных факторов.

Другим альтернативным способом обойти неопределенность, не анализируя (и соответственно не снижая) ее, является постулирование возможных неблагоприятных событий, т.е. рассмотрение их как детерминированных с обязательным учетом при проектировании. Постулирование широко используется, например, в атомной энергетике. Для эффективного применения этого способа при создании системы нового типа проектировщики должны обладать способностями предвидеть возможные неблагоприятные события любого происхождения и характеризовать связанные с ними экстремальные воздействия количественно.

Неопределенность другой категории обусловливается возникновением у системы свойств, отсутствующих у ее элементов. Неожиданные свойства возникают, наряду с потребительно полезными и иными прогнозируемыми качествами, как побочный результат объединения элементов в систему (путем сборки или монтажа, внедрения данной системы или ряда подобных систем в систему больших масштабов и сложности). Они способны проявиться лишь в особых условиях эксплуатации, поэтому для принципиально новой разработки их трудно предугадать. Примером может служить специфическое поведение (ранее неизвестное, но ныне уже изученное¹¹) механических соединений в энергетических установках, работающих при высоких температурах, которые вызывают ползучесть: вынужденное следование за упругой разгрузкой соседних частей конструкции (*elastic follow-up*). Оно имеет место при нагружении, управляемом деформацией¹², когда неупругие деформации развиваются лишь в небольшой области конструкции в зоне соединения, в то время как другие компоненты ведут себя упругим образом. В этом случае в менее жестких частях конструкции могут возникать деформации повышенных уровней из-за следования за упругой разгрузкой связанных с ними более жестких частей (Jawad and Jetter 2009), (ASME 2010). Влияние вынужденного следования на циклическую прочность выражается в сокращении прогнозируемого срока службы по сравнению со значением, получаемым путем упругого расчета, не учитывающего этот эффект. *Неопределенность из-за возникновения у системы свойств* трудно устранима на этапе проектирования. Так же, как и неопределенность предыдущей категории, она, конечно, может быть снижена в дальнейшем – по мере приобретения знаний из опыта. Вместе с этим, нельзя исключать возможность получения соответствующих знаний теоретически, с помощью совершенных математических моделей. Следует отметить, что специфические свойства систем и их возникновение являются предметом изучения специальной научно-технической дисциплины – системной инженерии (*systems engineering*), которая обладает развитым методическим аппаратом.

Еще одна категория неопределенности образуется непредсказуемыми проявлениями человеческого фактора – в лице персонала, публики, злоумышленников или их жертв¹³. Во многих случаях человек действует не «механически», предписанным (какой-либо инструкцией) образом, и не реагирует на внешнее воздействие непосредственно, а следует командам, которые формируются в его сознании. Формирование же команд базируется на оценке сочетания сигналов от органов чувств с врожденными инстинктами, приобретенными знаниями и навыками, физиологическими и психологическими особенностями в их текущем состоянии. Это сочетание обрабатывается

¹¹ И таким образом «переместившееся» из третьей области пространства факторов во вторую.

¹² В русскоязычных научно-технических публикациях используется термин «кинематическое» нагружение.

¹³ Особенности этих ролевых категорий человеческого фактора рассматриваются в книге Spirochkin (2023a).

двумя системами сознания: Системой 1 и Системой 2 (Kahneman 2011). Первая производит почти мгновенную интуитивную оценку, вторая функционирует медленнее и вырабатывает суждения более рационального, обдуманного характера. В результате, оценки одной и той же приходящей извне информации у разных индивидуумов или даже у одного, но в различные моменты времени, могут быть противоположными и приводить к принципиально отличающимся вариантам поведения. В критической ситуации эти варианты образуют широкий диапазон, включающий целенаправленные действия, бездействие и панику. Если вариация человеческих действий при выполнении регулярно повторяющихся производственных операций опытными специалистами может аппроксимироваться подходящим вероятностным распределением (чаще всего нормальным), то поведение, вызванное неожиданным событием, скорее характеризует уже упомянутый выше термин «пороговый эффект», а иногда оно бывает совершенно не предсказуемым. Учитывая возможность неумышленных ошибок создателей системы и эксплуатирующего ее персонала, хаотичного или злонамеренного поведения лиц из публики и неожиданных способов применения техники (например, в террористических целях), можно говорить о *неопределенности проявлений человеческого фактора*. Как и в случае первой или второй категории, эту неопределенность при проектировании трудно устранить – по крайней мере, на нынешнем уровне знаний. Надежный путь минимизации такой неопределенности лежит, очевидно, в русле изучения человеческой природы, включая бессознательные и патологические ментальные явления.

Наконец, необходимо рассмотреть аспекты маргинальной неопределенности, связанные с незнанием всех фундаментальных свойств нашего мира. О наличии неизвестных свойств свидетельствуют необъяснимые феномены, не отвечающие никакой теории, 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 Вселенной¹⁴. Нельзя исключать, что причина необъяснимости кроется не только в несовершенстве знаний об устройстве макро- и микромира в его текущем состоянии, но и в изменяемости фундаментальных свойств пространства-времени, которые принято считать константами. Возможное изменение мировых констант или отклонение времени от направленного равномерного течения – если принять любую из этих фантастических гипотез – пока не создает потенциала для прорывных открытий, которые способствовали бы техническому прогрессу, а с другой стороны, не представляет угрозы для функционирования существующей техносферы. Но до какого предела подобные проявления нестабильности не будут оказывать влияния на нашу жизнь среди технических систем, вдруг способных изменить свои свойства необъяснимым образом?

Наряду с гипотетической изменяемостью фундаментальных свойств (которая, скорее всего, тоже является фундаментальным свойством), в мире происходят не столь масштабные, но ощущаемые изменения – например, глобальное потепление или негативное воздействие информационных технологий на когнитивные способности новых поколений людей (Курпатов 2018; 2020)¹⁵. Другие проявления возможной изменяемости пока остаются незамеченными. Вне зависимости от того, какая гипотеза принимается или отвергается, можно утверждать о наличии такой категории, как *неопределенность из-за несовершенства фундаментальных знаний о мире*. Эта неопределенность представляется неустранимой в принципе. Ее снижение – предположительно следующее

¹⁴ Гипотеза расширяющейся Вселенной ныне подвергается серьезной критике.

¹⁵ Последнее явление рассмотрено и прокомментировано в книге Spirochkin (2023a).

асимптотическому закону – осуществимо путем тщательных физических исследований (включая наблюдения, математическое моделирование и эксперименты), проводимых в максимально широком пространственном и временном диапазонах и на постоянной основе.

Таким образом, неоднородность маргинальной неопределенности, соответствующей третьей области пространства Φ , можно охарактеризовать, разделив ее, по меньшей мере, на четыре категории, как это показано на рисунке 3. Как и в предыдущем случае, применяется ранжирование уровней неопределенности, но в иной шкале, которая учитывает имеющиеся в настоящее время возможности обращения с неопределенностью, в том числе способы обойти ее.

Благодаря наличию таких способов (минимизация потерь, постулирование) самый низкий уровень придается неопределенности из-за неполноты прикладных (технических) знаний (категория 1). Наиболее высоким уровнем характеризуется неопределенность из-за несовершенства фундаментальных знаний о мире (категория 4). Две другие категории неопределенности занимают промежуточные уровни (их соотношение, как и раньше, не очень важно).

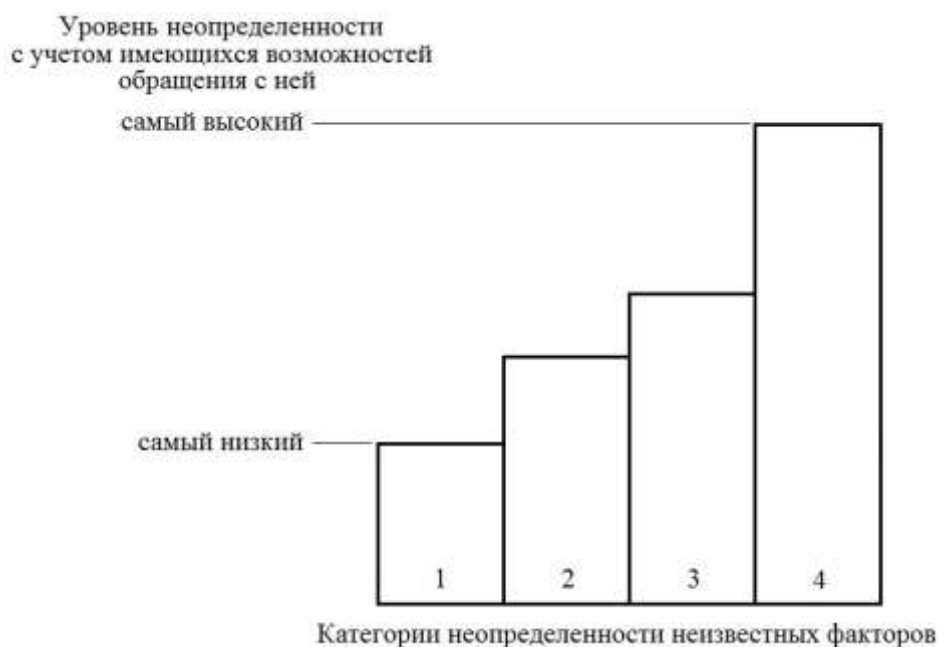


Рисунок 3 – Неоднородность неопределенности в третьей области пространства факторов (1 – неопределенность из-за неполноты прикладных (технических) знаний; 2 – неопределенность из-за возникновения у системы свойств; 3 – неопределенность проявлений человеческого фактора; 4 – неопределенность из-за несовершенства фундаментальных знаний о мире)

4. Промежуточные выводы

Проведенное рассмотрение различных аспектов неопределенности факторов, требующих учета при проектировании технических систем, позволяет сделать следующие выводы (промежуточные в рамках текущего исследования):

1. Факторы, способные оказать существенное влияние на состояние создаваемой системы в процессе эксплуатации и реакцию на эксплуатационные воздействия, образуют пространство, заметной особенностью которого является неоднородность по степени неопределенности факторов, источникам неопределенности и возможностям обращения с ней.

2. В зависимости от степени неопределенности это пространство можно разделить на три области: первая отвечает известным определенным факторам, вторая – известным неопределенным факторам, а третья – неизвестным факторам. Структура такого разделения представима в виде внутреннего «ядра», соответствующего первой области, и двух окружающих его «оболочек», в которых «сосредоточена» неопределенность.
3. Неоднородность известных неопределенных факторов («оболочка», прилегающая к «ядру») обусловлена различием источников неопределенности и возможностей ее снижения на этапе проектирования. Для характеристики этой неопределенности введено 7 категорий, отличающихся друг от друга ее уровнями; при установлении уровней учтены и возможности снижения неопределенности.
4. Неизвестные факторы образуют наружную «оболочку» с непредсказуемым числом пространственных размерностей и неустановленной внешней границей. Неопределенность здесь является маргинальной, тем не менее, в ней можно выделить составляющие различного генезиса с разными способами обращения. Этим составляющим сопоставлены 4 категории неопределенности. Ни одна из них не может быть устранена на этапе проектирования системы. Возможности какого-либо снижения неопределенности ограничены и реализуются, в основном, на постпроектных этапах жизненного цикла. Однако в целях обеспечения безопасности в ряде случаев применимы способы обхода неопределенности без ее анализа, которые позволяют снизить риск, связанный с потенциальными потерями.
5. Таким образом, выявлена структура неопределенности при проектировании и намечены подходы к управлению ею¹⁶, которые – в случае трансформации в соответствующие рекомендации и методы и после проверки их на практике – способны привести к повышению эффективности и безопасности создаваемых систем в трудно предсказуемых условиях эксплуатации.

Библиография

- 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
- Cavallaro E (2019) Eyes on the skies. NRL researchers tackle the ever-growing problem of orbital debris. Future Force (Naval Science and Technology Magazine), Vol. 5, # 4, 2019, p. 7-17, or Emmanuel Cavallaro | Blog, May 09, 2019. <http://www.emmanuelcavallaro.com/blog/2019/5/9/eyes-on-the-skies-nrl-researchers-tackle-the-ever-growing-problem-of-orbital-debris>. Accessed 2023-07-11
- 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 2023-02-06
- FAA (2011) Federal Aviation Administration. Introduction to TCAS II. Version 7.1. February 28, 2011. U.S. Department of Transportation, FAA, Washington, DC. https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/tcas%20ii%20v7.1%20intro%20booklet.pdf. Accessed 2023-07-18
- FAA-H-8083-6 (2021) Advanced Avionics Handbook. Released in 2009, includes all errata/addenda as of 2022. November 2021. FAA, Washington, DC

¹⁶ Т.е. выполнена задача, поставленная в публикации Spirochkin (2023b).

- IAEA (2021a) IAEA Safety Standards Series No. SSG-67. Seismic Design for Nuclear Installations. Specific safety guide. IAEA, Vienna
- IAEA (2021b) IAEA Safety Standards Series No. SSG-68. Design of nuclear installation against external events excluding earthquakes. Specific safety guide. IAEA, Vienna
- IAEA (2022) IAEA Safety Standards Series No. SSG-9 (Rev. 1). Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations. Specific safety guide. IAEA, Vienna
- ISO/IEC/IEEE 24765:2017. International standard. Systems and software engineering – Vocabulary. ISO, Geneva
- Jawad MH, Jetter RI (2009) Design and analysis of ASME boiler and pressure vessels components in the creep range. ASME Press, New York
- Kahneman D (2011) Thinking, fast and slow. Penguin Books, London (Есть русскоязычное издание: Канеман Д (2018) Думай медленно... решай быстро. – М.: Издательство АСТ)
- Курпатов АВ (2018) Нейронаука о нарастающей глупости. Фонтанка.Ру, 15 января 2018. <https://www.fontanka.ru/2018/01/15/060>. Accessed 2023-07-31
- Курпатов АВ (2020) Выступление в Давосе на бизнес-завтраке Сбербанка. YouTube, 29 января 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=GbLclnu-QGc>. Accessed 2023-07-31
- Newman MEJ (2005). Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. Contemporary Physics 46(5):323-351
- 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 2022-11-30
- Spirochkin Y (2023a) Human factors and design. Springer, Singapore
- Spirochkin Y (2023b) On the problem of uncertainty in the design of technical systems – Introduction. Design Problems and Knowledge Management (Electronic journal), Issue 5, June 2023. <https://spirochkin.wixsite.com/info/journal>
- Taleb NN (2007) The Black Swan. The impact of the highly improbable. Random House, New York (Есть русскоязычное издание: Талеб НН (2018) Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости. – 2-е изд, доп. – М.: КоЛибри, Азбука-Аттикус)