

## ПРОБЛЕМА НАДЕЖНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

*Решение вопросов безопасности жизнедеятельности человека во многом определяется степенью надежности биологических систем организма, испытывающих воздействие не только традиционных профессиональных вредностей, стихийных бедствий, но и других конкретных факторов риска (ионизирующих и неионизирующих излучений, химических агентов, психо-эмоциональных стрессов). Поэтому в работе эта проблема рассматривается сквозь призму системной организации биологических объектов, системного подхода, анализа и теории надежности, как методологической основы изучения механизмов, ограничивающих существование как технических, так и биологических систем. Отдельно выделены основные параметры, характеризующие надежность или жизнеспособность систем, принципы их формирования и индивидуального развития. Подчеркивается, что все жизненно важные процессы, протекающие в живых организмах, являются биокинетическими и не противоречат возможностям применения неравновесной термодинамики для открытых (биологических) систем.*

**Ключевые слова:** безопасность жизнедеятельности, биологические системы, системный подход и анализ, надежность.

*Вирішення питань з безпеки життєдіяльності людини багато в чому визначається ступенем надійності біологічних систем організму, котрі зазнають впливу не тільки традиційних професійних шкідливостей, стихійних лих, але й інших конкретних факторів ризику (іонізуючих та неіонізуючих випромінювань, хімічних агентів, психо-емоційних стресів). Тому в роботі ця проблема розглядається крізь призму системної організації біологічних об'єктів, системного підходу, аналізу і теорії надійності, як методологічної основи вивчення механізмів, які обмежують існування як технічних, так і біологічних систем. Окремо виділено основні параметри, котрі характеризують надійність або життєздатність систем, принципи їх формування та індивідуального розвитку. Підкреслюється, що всі життєво важливі процеси, які протікають у живих організмах, є біокінетичними і не суперечать можливостям застосування нерівноважної термодинаміки для відкритих (біологічних) систем.*

**Ключові слова:** безпека життєдіяльності, біологічні системи, системний підхід та аналіз, надійність.

*Resolution of questions safety of human life is largely determined by the degree of reliability of the biological systems of the body impacted not only the traditional occupational hazards, natural disasters, and other specific factors (ionizing and non-ionizing radiation, chemical agents, and psycho-emotional stress). Therefore, in the article, this problem is considered in the light of the systemic organization of biological objects, systematic approach, analysis and reliability theory as a methodological basis of the mechanisms limiting the existence of both technical and biological systems. Separately identified the main parameters that characterize the reliability and viability of the system, the principles of the formation and development of the individual. It is emphasized that all the vital processes occurring in living organisms, and are not inconsistent with biokinetic capabilities of nonequilibrium thermodynamics for open (biological) systems*

**Key words:** life safety, biological systems, systems approach and analysis, reliability.

Безопасность жизнедеятельности человека зависит не только от отрицательного воздействия различных традиционных профессиональных вредностей, стихийных бедствий, но и других конкретных факторов риска, таких как кратковременное или систематическое влияние ионизирующих и неионизирующих излучений, химических агентов, психо-эмоционального стресса.

Во многом она определяется степенью надежности биологических систем организма, испытывающих это влияние и реагирующих на него через информационные системы – нервную, эндокринную, иммунную. Основы теории надежности технических и биологических систем были разработаны во второй половине прошлого столетия.

В целостном организме реакции клеток, тканей, органов и систем в ответ на воздействие негативных факторов внешней и внутренней среды не бывают изолированными. Они носят кооперативный (системный) характер и во многом зависят от качественных и количественных особенностей этих реакций на разных уровнях биологической организации. Качество реакции в сторону увеличения или уменьшения параметра, отражающего ту или иную функцию, и ее количественная характеристика определяются феноменологией возникающих эффектов. Крупный патоморфолог Д. С. Саркисов пишет [1]: «В принципе ни один фактор внешней или внутренней среды не может оказать влияния на ту или иную функцию непосредственно, она меняется исключительно через первичное действие этих факторов на соответствующие структуры, «вырабатывающие» эту функцию (рецепторы органов, тканей, клеточной поверхности, генетический аппарат, те или иные ультраструктуры ядра и цитоплазмы и т. д.). Таким же образом действуют яды и лекарства».

Для понимания рассматриваемой проблемы следует остановиться на общих принципах организации биологических систем. Живые организмы представляют собой открытые динамические системы. Важнейшие процессы, в них протекающие, – химические реакции и транспорт веществ. Прямые и обратные связи, определяющие поведение живой клетки, регулируют ее жизнедеятельности, реализуются специфическими молекулами и надмолекулярными системами на основе молекулярного узнавания [2].

Взаимодействие системы со средой происходит через составляющие ее элементы, каждый из которых может взаимодействовать со средой независимо друг от друга. Целью элементов является сохранение устойчивого состояния в течение достаточно продолжительного времени или «выживание». Воздействие со стороны среды носит характер возмущения, выводящего элемент из устойчивого состояния с возможным гибельным исходом. Поэтому подвергаемые разрушительному воздействию среды элементы вынуждены объединяться в систему с целью увеличения вероятности выживания, повышения надежности, устойчивости и т. д. Поэтому и возникают высокомолекулярные соединения, живые организмы, популяции, общественные образования.

Однако проблема системной организации носит противоречивый характер: объединение элементов в систему расширяет возможности системы в целом, но ограничивает возможности самих элементов.

Связи в системе образуют ее структуру, характеристики которой и обеспечивают в конкретном плане «поведение» системы как единого целого. Главной структурной особенностью, определяющей целостность системы, является нелинейность, которую можно выразить как невозможность линейного представления взаимодействия и взаимосвязи элементов системы. Вместе с другой системной особенностью – иерархичностью структуры – нелинейность придает «усилительный» характер этой структуре, что приводит к таким особенностям сложных систем, как: лавинообразные процессы; спонтанность и непредсказуемость поведения, пороговые эффекты (скачкообразные

переходы, дискретность состояний и пр.); экспоненциальные и логарифмические зависимости; наличие ветвящихся процессов и др. [3].

Крайне важным является понимание принципов организации биологических систем. Известно, что фило- и онтогенетическое развитие любой биологической системы возможно лишь при широком диапазоне колебаний жизненных процессов как в системе в целом, так и в отдельных ее звеньях. Нормально функционирующая и развивающаяся система не может непрерывно находиться на грани жизни и смерти, когда любое изменение внешних и внутренних условий может прервать ее дальнейшее развитие. Система не может существовать и тем более развиваться, если она не обладает достаточным запасом прочности, обеспечивающим ей свойства надежности и адаптивности. Иными словами, наличие широкого диапазона жизненных возможностей является основным условием существования биологических систем. Колебания или отклонения (применительно к физиологическим, гомеостатическим системам применяют термин «реакции»), происходящие в системе в допустимых пределах, возможны благодаря регуляторным механизмам, осуществляющим возврат к исходному состоянию, или так называемому состоянию относительного постоянства.

*Системный подход* в биологии предполагает, во-первых, что живой организм представляет собою многоуровневую систему взаимосвязанных, но не однозначных процессов, происходящих в определенных пространственных и временных границах; во-вторых, что способность удерживать эти границы – имманентное свойство биосистем, определяющее в конечном счете способность органического мира к эволюции; и, в-третьих, что закономерности одного системного уровня несовместимы с закономерностями иных системных уровней биоиерархической организации.

*Системный анализ* связан с разработкой научного инструментария, позволяющего решать практические задачи по пониманию сущности и конструированию систем, включающих человеческий, целенаправленный фактор, и по управлению такими системами. Системный анализ является проекцией идей, связанных с общей теорией систем и системным подходом, на практические исследовательские задачи.

В первом приближении можно считать, что системный подход, системный анализ и общая теория систем отражают оперативные, тактические и стратегические задачи изучения сложных систем, в том числе биологических. Предпосылкой изучения биосистем является их описание. При этом возникают трудности, связанные с системной сложностью. Во-первых, измерение всех переменных, с помощью которых можно провести описание, трудоёмко, а в ряде случаев невозможно. Во-вторых, достаточно сложно установление взаимосвязей между переменными уже после того, как их измерения занесены в исследовательский протокол. В-третьих, способность человека к восприятию ограничена. Выбрать минимальное число показателей, достаточное для изучения системы, а затем конструктивно увязать их между собой – задача,

которая относится к стратегии научного сознания. По этим причинам в современном естествознании основным методом изучения очень сложных систем признается математическое моделирование. Например, экспериментально воспроизвести процесс эволюции на Земле во всей его протяженности и многообразии нельзя, но его модели вполне доступны для эксперимента.

*Теория надежности* является методологической основой изучения механизмов, ограничивающих существование как технических, так и биологических систем. В случае биологических объектов речь идет о механизмах, определяющих продолжительность их жизни. Между процессами, ограничивающими продолжительность жизни организмов, и процессами износа, которые мы наблюдаем в неживой природе, существует определенная аналогия. В проблеме надежности ключевую роль играет возраст функционирования технического устройства или биосистемы, как важнейшей переменной, определяющей частоту поломок, отказов или болезней, а также бимодальный характер распределения числа повреждений в зависимости от возраста. Современные данные подтверждают справедливость этого и свидетельствуют о том, что бимодальное распределение отказов является универсальной и фундаментальной закономерностью, справедливой как для живых существ, так и для технических устройств.

В настоящее время в теории надежности выделяют следующие три периода функционирования систем.

1) Период приработки, называемый также периодом «выжигания» дефектных элементов. Он характеризуется высокой начальной интенсивностью отказов, резко снижающийся со временем. Именно такая же динамика интенсивности смертности наблюдается в начале жизни большинства организмов, включая человека. У человека этот период соответствует возрасту повышенной детской смертности (0-5 лет) и также в значительной мере обусловлен преимущественной гибелью ослабленных организмов с врожденными дефектами.

2) Период нормальной работы, соответствующий возрасту низкой и приблизительно постоянной интенсивности отказов. Этому периоду соответствует наблюдаемый у всех живых существ период низкой и примерно постоянной интенсивности смертности. Для человека этот период оказывается довольно коротким и кончается слишком рано – 10-15 лет.

3) Период старения, проявляющийся в неуклонном росте интенсивности отказов с возрастом. Этому периоду соответствует период роста интенсивности смертности, который также характерен для большинства живых существ, и описывается обычно законом Гомпертца-Мейкхэма, основной смысл которого состоит в том, что на значительном возрастном интервале интенсивность смертности растет по закону геометрической прогрессии, т. е. экспоненциально. Для человека период старения находится в пределах примерно от 20 до 100 лет.

Таким образом, существует удивительное сходство в распределении времен жизни технических и биологических систем, имеющее бимодальный

характер. Это сходство не только внешнее, но и внутреннее. Однако эта аналогия долгое время не имела своего научного развития. Отчасти это было связано с тем, что сама теория надежности как научная дисциплина начала формироваться в годы второй мировой войны в связи с опытом эксплуатации сложных радиоэлектронных систем. Да и само по себе сопоставление биологических и технических систем мало что могло дать, поскольку эти системы долгое время были просто несоизмеримы по своей сложности. Поэтому такие попытки сопоставления воспринимались как проявление механицизма. В этом отношении весьма показательны высказывание А. Комфорта: «Различия между старой телегой и старой лошадей слишком разительны, чтобы можно было рассматривать «изнашивание» в широком смысле как объяснение старения» [4]. Поэтому большинство биологов, изучающих старение, продолжительность и безопасность жизни, считало концепцию износа чрезмерным упрощением и свои усилия направляло на поиск генетической программы старения, выделение белков и гормонов «старения», а также на поиск биологических часов, определяющих видовой предел продолжительности жизни. Эти исследования, несмотря на ряд несомненных удач, связанных с установлением кардинальных научных фактов, не имеют принципиального значения для развития теории надежности биологических систем и безопасности жизнедеятельности в целом.

В то же время, по мере технического прогресса, прежде всего, с развитием кибернетики и бионики начался процесс стирания различий между биологическими и техническими системами, были найдены общие принципы функционирования тех и других. В конечном итоге, все основные препятствия и недоразумения, стоявшие на пути использования теории надежности в биологии, к настоящему времени устранены. Создан математический аппарат этой теории, который может быть применен для изучения как сложных технических, так и биологических систем. Математическая теория надежности может служить вполне достаточной методологической основой для изучения механизмов и факторов, определяющих развитие тех или иных патологических процессов, которые усиливают опасность жизнедеятельности и лимитируют продолжительность жизни, поскольку она не навязывает свои решения, а лишь указывает на наиболее эффективные методы исследования. Это не цель, а средство.

Среди основных параметров, характеризующих надежность или жизнеспособность систем, выделяют следующие.

*Устойчивость*, т. е. способность восстанавливать установившееся состояние после возмущающих воздействий. Известно, например, что в пораженном физическими и химическими агентами организме происходит заметное падение динамической устойчивости по отношению к экзо- и/или эндогенным факторам.

*Точность выполнения операции (адекватность реакции в биологии)* по отношению к заданности того или иного процесса, либо способа его воплощения.

Отклонение от заданного способа или теоретического расчета (в технических системах), либо от нормы реакции (в биологических) характеризует величину ошибки. Применительно к биологии многие системные физиологические, биохимические реакции в ответ на действие возмущающих факторов (раздражителей) количественно и качественно изменяются.

*Быстрота операции (скорость реакции)*, т. е. среднестатистическое число операций или скорость отклонения от устойчивого (равновесного) состояния биологических параметров за единицу времени. В качестве примера можно привести уменьшение скорости распространения нервного импульса, наблюдаемое при естественном старении и после радиационного воздействия.

*Нагрузочная характеристика*, которая рассматривается как параметр, характеризующий связь между величиной нагрузки (силой возмущающего воздействия) и ответом системы. В частности, для иллюстрации отметим, что многие ткани организма под физико-химическим «прессингом» многих внешнесредовых факторов реагируют на гормоны при меньших их концентрациях, однако величина максимального ответа на высокие концентрации у них уменьшена. Это означает, что диапазон изменения ответа системы на стимул сужается.

Таким образом, использование теории надежности позволяет разумно классифицировать множество различных изменений в организме (адаптационно-приспособительного, компенсационного, патологического, восстановительного характера), обращая при этом особое внимание на те, которые существенны для его жизнеспособности.

Выход значений перечисленных параметров за допустимые пределы в теории надежности называют «отказом». Большинство систем организма являются избыточными по числу функционирующих элементов. Такое резервирование обеспечивает нормальную работу системы в целом даже при временном отказе большей группы элементов. Однако уменьшение числа элементов по разным причинам (болезнь, лучевая или химическая травма, старение), т. е. снижение резервирования ведет к существенному ослаблению надежности системы и увеличению вероятности смерти.

А. А. Маркосян [5] сформулировал и предложил четыре принципа надежности биологической системы.

- а) принцип избыточности элементов управления и протекающего процесса;
- б) принцип дублирования и взаимозаменяемости элементов регулирования и процесса;
- в) принцип совершенного и быстрого возврата к состоянию относительного постоянства;
- г) принцип динамичности взаимодействия звеньев самой системы.

Он выделил четыре периода индивидуального развития биологической системы: (1) становления и

формирования надежности; (2) развития надежности; (3) стабилизации надежности; (4) нарушения надежности.

Никто не сомневается в том, что развитие – это противоречивый процесс, поэтому периодизация индивидуального развития любой биологической системы является условной. В природе действуют общие законы, диалектическая сущность которых часто не лежит на поверхности. В нашем случае – это законы развития организма и законы термодинамики. В соответствии с основами термодинамики функционирование открытой системы, какой является живой организм, может искусственно поддерживаться, если каким-то образом прилагается усилие, направленное на сохранение упорядоченности в живой системе, которое противодействует возрастанию в ней энтропии (как меры разупорядоченности), но приводит к увеличению энтропии в окружающей среде. Применительно к живым существам данное положение достаточно емко выражено в законе Клода Бернара, согласно которому «свободная жизнь организма возможна только при сохранении постоянства состава его внутренней среды».

По мнению М. В. Волькенштейна [2], важнейшая особенность обсуждаемой ситуации состоит в том, что биологическая система не является статистической; это – динамическая система, своего рода химическая машина, поведение которой определяется положением и функциональностью взаимозависимых составных частей. Части эти макроскопичны (макромолекулы, надмолекулярные системы, клетки, ткани), соответственно функциональные изменения их относительно расположения не сопровождаются сколько-нибудь заметными изменениями энтропии. Биологическая система есть система именно в том смысле, что ее части взаимосвязаны и их энергия не аддитивна. Тем самым, в системе не выполняются исходные предпосылки статистической механики, и работа биологической машины не может быть полно описана в терминах энтропии или количества информации. На этом основании автор считает, что эффективность рассмотрения открытой системы, исходящего из функции диссипации, т. е. из скорости продукции энтропии, по-видимому, недостаточна для биологии. Энтропия – принципиально усредненная статистическая величина, которая дает лишь весьма ограниченную характеристику биологической системы, что, однако, никак не противоречит описанным выше возможностям применения неравновесной термодинамики в биологии, ибо термодинамика открытых (биологических) систем, в сущности, кинетика. Все жизненноважные процессы (развитие, метаболизм, гомеостаз), протекающие в живых организмах, являются биокинетическими.

Таковы, в общих чертах, приложения теории надежности биологических систем к научной дисциплине, которой является безопасность жизнедеятельности.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Саркисов Д. С. «О так называемых функциональных болезнях» / Д. С. Саркисов // Клиническая медицина. – 1997. – № 6. – С. 77.
2. Волькенштейн М. В. Общая биофизика / М. В. Волькенштейн. – Москва : Наука, 1978. – 590 с.
3. Яблонский А. И. Математические модели в исследовании науки / А. И. Яблонский. – Москва : Наука, 1986. – 352 с.
4. Комфорт А. Биология старения / А. Комфорт. – Москва : Мир, 1967. – 397 с.
5. Маркосян А. А. Надежность биологической системы на разных этапах онтогенеза и проблема развития / А. А. Маркосян // Онтогенез системы свертывания крови. – Ленинград : Изд-во Наука, 1968. – С. 158–169.

Рецензент: *Глива В. А.*, д.т.н., доцент;  
*Кутковецький В. Я.*, д.т.н., професор.

© Коваленко В. В., 2012      *Дата надходження статті до редколегії 17.12.2012 р.*

**КОВАЛЕНКО В. В.** – к.б.н., доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Института экологической безопасности, Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина.

*Коло наукових інтересів:* повышение надежности биологических систем, безопасность жизнедеятельности человека.