

УДК 614.8

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ

**Н.С. Попов, Н.В. Лузгачева, А. Хайри**

*ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор М.А. Промтов*

**Ключевые слова и фразы:** методология; научные основы; теоретический базис; теория безопасности.

**Аннотация:** Представлена наука о безопасности, как самостоятельная область знаний, основанная на достижениях ранее существовавших наук, сходных с ней в целях и методах. Очерчен круг проблем этой науки, интересов, которые она преследует, и задач, которые ей предстоит для этого решить.

Эффективность экономического развития государства и состояние систем его промышленной, экологической, энергетической, социальной и иных видов безопасности находятся во взаимосвязи друг с другом: чем эффективнее экономика, тем изобретательнее технологии ее защиты, а чем совершеннее «охранный комплекс», тем стабильнее протекают в государстве все жизненно важные процессы. Вместе с тем безопасность, как свойство или качество систем жизнеобеспечения государства, относится к затратным категориям, в связи с чем приходится признавать приоритет экономического развития перед планированием мер безопасности (за исключением применения целевого планирования безопасности объектов). В таком случае формулу «безопасность через развитие» надо рассматривать в качестве ведущего принципа разработки и реализации стратегии устойчивого развития России [1].

Этот принцип позволяет предположить, что ценность знаний по организации систем безопасности общества и государства в условиях роста глобальной экономики, глобальных климатических изменений, глобального дефицита энергоресурсов будут непременно возрастать из-за возникновения новых угроз и, как следствие этого, из-за необходимости поиска и применения новых теоретических и прикладных методов решения задач

---

Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: eco@nnn.tstu.ru; Лузгачева Надежда Валерьевна – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Хайри Абугхали – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, г. Тамбов.

безопасности природы и общества, создания научно обоснованных технологий защиты объектов хозяйства страны от внутренних и внешних угроз.

По мнению авторов работ [2–4] своими корнями учение о безопасности восходит к мыслителям древности – Аристотелю, Гиппократу, Парацельсу, Еврипиду, Галену, Плинию и другим. История этого учения свидетельствует о том, что потребность в обеспечении безопасности существовала всегда. Она не только сопровождала все виды деятельности человека, но и содействовала их реализации, а сегодня оказалась краеугольным камнем в существовании земной цивилизации. Со временем учение о безопасности превратилось в многоотраслевую систему знаний, без которой невозможно обойтись в задачах защиты экономики, природы и общества от всех видов угроз [5].

Перспектива развития учения о безопасности жизни и деятельности человека очевидна: необходимо построить устойчивую систему самых общих представлений о безопасности и методологию ее анализа – «своего рода философию безопасности или науку о безопасности» [6], сознавая при этом, что общественным признанием любой науки является отображение действительности не только в эмпирических фактах, но и в образах, абстракциях, понятиях, объединенных логико-смысловой систематизацией, наличием теоретических законов, аксиом, обобщений, теорем, категорий и методов. На сегодня следует говорить больше о возникновении прикладной науки о безопасности. Фундаментальная наука – это лишь «перспектива, способная стать действительностью только при приобретении указанных выше признаков» [10]. К этим признакам добавим прогностическую силу науки и полезность ее в решении новых, неожиданно возникающих у человека и общества проблем.

Надо полагать, что цели науки, стоящей на службе общественного развития, будут определяться этим процессом в течение достаточно длительного периода времени [8, с. 54]. В нынешних условиях государственная политика в области обеспечения природной и техногенной безопасности ведется по следующим направлениям [9]:

- выявление опасностей, оценка риска и прогнозирование чрезвычайных ситуаций;
- уменьшение риска и повышение эффективности защиты населения и территорий;
- государственное регулирование в области снижения рисков и смягчения последствий техногенных аварий и стихийных бедствий;
- развитие и совершенствование сил и средств ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Характер этих общепризнанных интересов науки о безопасности подчеркивает исключительно прикладную ее значимость, затрудняя понимание теоретических подходов, без которых невозможно дальнейшее развитие науки, но для этого надо по-иному подходить к формулировке целей теории безопасности, – таким образом, чтобы при их реализации обеспечивалась генерация фундаментальных знаний о природе опасностей и способах защиты от них.

В настоящее время невозможно назвать какую-либо науку, развитие которой осуществлялось бы независимо от результатов других наук, без заимствования уже существующих принципов, методов или технологий. Если это и происходит, значит такие науки имеют в чем-то родственные корни, сходные интересы и способности к взаимообогащению знаниями. Однако не менее важно разобраться и с тонкостями каждой отдельной науки, ее собственными оригинальными идеями и методами решения задач.

Проведем анализ методологических особенностей науки о безопасности в аспекте развития ее теоретического базиса. Дело в том, что теория безопасности относительно молодая и динамично развивающаяся отрасль знаний, исходные постулаты и научные подходы которой сегодня не до конца осознаны [10]. В таком случае все специфические особенности и приоритеты науки о безопасности необходимо выявить, обосновать и обсудить широкому кругу ученых для того, чтобы определить классы задач, решение которых наиболее эффективно осуществлять методами, свойственными ей.

Проведем анализ ряда сходных признаков и отличий теории безопасности от других наук, оказавших на нее значительное влияние в период становления и развития. К их числу следует отнести, как минимум, теорию системного подхода, теорию устойчивости, теорию катастроф, теорию управления, теорию надежности и теорию вероятностей. Используя теоретико-множественное отображение полей знаний каждой из названных наук, условно выразим их совместное влияние на теорию безопасности с помощью рис. 1. Заштрихованная область есть результат симбиоза знаний различных теорий, отвечающих следующим научным задачам теории безопасности:

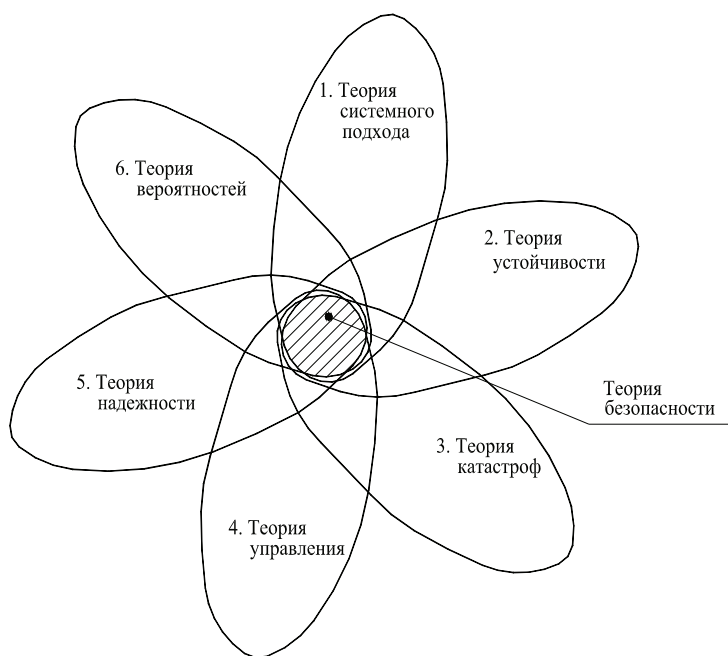


Рис. 1. Область знаний теории безопасности как науки

- 1) анализа устойчивости и структурной целостности объектов исследования;
- 2) изучения условий стабильности процессов и свойств материалов, определяющих жизнеспособность объектов исследования;
- 3) моделирования поведения объектов исследования в условиях неопределенности;
- 4) синтеза систем защиты объектов исследования от возникновения в процессе их функционирования критических состояний и нежелательных режимов работы с разрушительными или тяжелыми последствиями как для самих объектов, так и для их окружения.

Под объектами исследования будем понимать, прежде всего, существующие в обстановке внутренних и внешних возмущений динамические системы, анализ движения которых изучается на математических моделях методами теории устойчивости [11]. Поскольку эта теория может иметь дело с объектами высокой степени сложности, размерности и неопределенности (городскими, региональными, технологическими, природо-промышленными и т.д.), их изучение, моделирование и анализ поведения невозможны без применения особого научного подхода, именуемого системным, с его конкретными видами реализации: кибернетикой, системным анализом и исследованием операций [12, 13].

Сущность системного подхода выразим так:

- 1) формулирование целей и выяснение их иерархий до начала деятельности, связанной с принятием решений. Постановка задач исследования;
- 2) получение максимального эффекта достижения целей при минимальных затратах в результате сравнительного анализа альтернатив и методов достижения целей и осуществления соответствующего выбора;
- 3) количественная оценка целей, методов и средств их достижения, основанная на всесторонней оценке всех возможных и планируемых результатов деятельности.

Диалектика системного подхода необычайно гибка: любой объект исследования, в зависимости от поставленных задач, может выступать и на «собственном» независимом уровне, и в виде целостной системы, и в виде элемента более сложной «внешней» системы. Системный охват крайне полезен для изучения проблем теории безопасности, поскольку рассматривает их с разных сторон с помощью специалистов различных профилей и профессий.

Методами кибернетики удастся представить любой объект исследования в наглядном виде (например, в виде схемы), определить его потенциально возможную структуру, классифицировать входные и выходные воздействия. Затем методами системного анализа можно провести декомпозицию сложного объекта на более простые и понятные исследователю «элементы», выяснить их назначение, особенности «индивидуального» и «совместного» поведения. Методы исследования операций полезны при создании математических моделей поведения элементов и системы в целом, проведении анализа их работы с тем, чтобы оценить правомочность сделанных о системе гипотез и подготовить исследователя к принятию нужных решений.

В ходе анализа может оказаться, что поведение «целого» существенно отличается от поведения составных его частей. Известны примеры, когда система как целое устойчива, а ее отдельные части неустойчивы и наоборот. Распространенной является и другая ситуация, в которой исследуемый объект ведет себя как детерминированный, тогда как его элементы (подсистемы) имеют какой-либо недетерминированный тип поведения. Такие системы именуют макросистемами [14]. К ним, в частности, относятся и природопромышленные, одновременно имеющие отношение к проблемам и техногенной, и экологической безопасности [15]. Различные примеры использования системного подхода в задачах теории безопасности приведены, например, в работах [5, 16, 17].

Известные алгоритмы анализа поведения сложных и многомерных систем содержат [18]:

- декомпозицию системы на взаимосвязанные подсистемы в соответствии с заранее выбранным графом декомпозиции;
- анализ поведения каждой отдельной подсистемы, как если бы она была изолированной;
- поочередный анализ взаимосвязей между парами подсистем;
- агрегирование собранной информации в новой системе уменьшенных размеров с тем же числом подсистем, на которые была разбита макросистема;
- формулировка выводов, касающихся характеристик устойчивости макросистемы на базе анализа системы уменьшенных размеров.

Для лучшего понимания целей данной работы воспользуемся идеями системного подхода и изобразим гипотетическую макросистему в виде черного ящика на рис. 2. В составе переменных системы:  $Z$  – множество идентифицируемых входных воздействий;  $\Xi$  – множество внешних воздействий случайного характера (опасностей, угроз);  $U$  – множество управляющих или защитных мер, находящихся в распоряжении менеджеров по рискам;  $A$  – множество структурных параметров системы;  $E$  – множество внутренних опасностей, угроз;  $X$  – множество переменных состояния.

Пусть  $M$  означает модель системы в операторном виде. Тогда возможна следующая формальная запись

$$M: Z \times \Xi \times U \times A \times E \times [0, T] \rightarrow X, \quad (1)$$

где  $[0, T]$  – период реальной работы системы; « $\times$ » – знак декартова произведения.

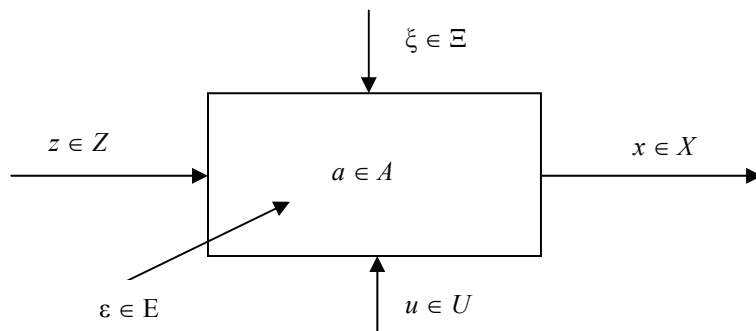


Рис 2. Объект исследования теории безопасности

Внешние  $\xi \in \Xi$  и внутренние  $\varepsilon \in E$  опасности и угрозы, очевидно, каким-то образом влияют на поведение системы через переменные  $z \in Z$  и параметры  $a \in A$  с помощью некоторых известных механизмов:  $z = z(\xi)$  и  $a = a(\varepsilon)$ . Если  $M$  допускает описание в форме дифференциальных уравнений, тогда модель системы имеет вид

$$x' = f(z(\xi), u, a(\varepsilon), x, t), \quad (2)$$

где  $f$  – известная вектор-функция;  $z(\xi)$ ,  $u$ ,  $a(\varepsilon)$ ,  $x$  – векторы множеств  $Z$ ,  $U$ ,  $A$  и  $X$  соответственно, с начальными условиями  $x(t_0) = x_0$ .

Заметим, что в каждой конкретной ситуации модель (2) является сверткой информации, доступной исследователю, и обладает адекватностью в рамках принятых допущений об объекте исследования и диапазонах изменения его переменных. В этой связи возникают два важных вопроса.

1. Способна ли модель вида (2) описать все три процесса в «жизненном цикле» аварии: нормального функционирования объекта исследования, формирования условий для возникновения нештатной ситуации (аварии) и развития последствий аварии?

2. Может ли модель (2) дать новые знания о поведении объекта, если в процессе построения модели исследователь уже использовал информацию о возможных режимах его работы?

Ответ на первый вопрос отрицателен. Модель (2) необходима, прежде всего, для установления причин или механизмов нестабильного поведения системы и определения границ ее устойчивости. Ответ на второй вопрос положителен: модель (2) является композицией моделей элементов и подсистем, поэтому поведение системы в целом можно выяснить только в ходе проведения численного (имитационного) эксперимента на ее основе. Для макросистем изучение равновесия и динамики процессов касается, в основном, описания изменения их детерминированных макрохарактеристик.

В зависимости от значений начальных условий  $x_0$ , типа и уровня внешних  $\xi$  и внутренних  $\varepsilon$  воздействий, а также их сочетания, модель (2) позволяет получить семейство характерных для нее фазовых траекторий. Эти траектории являются объектом анализа системы на устойчивость. Упор на устойчивость поведения объектов исследования в задачах 1–4 вполне логичен, так как управление неустойчивыми, а значит и непредсказуемыми (в смысле траекторий движения) объектами невозможно. Идеи устойчивости продуктивны при решении проблем безопасности в том смысле, что позволяют с научных позиций объяснить причины возникновения нештатных ситуаций на объектах исследования и способствуют нахождению способов защиты последних.

Если в задачах теории управления интерес вызывает изучение и поддержание условий динамического равновесия, поскольку в этих состояниях функция полезности системы достигает максимума, то в задачах теории безопасности главное – определение границ устойчивости, нарушение которых может означать не только утрату равновесного состояния динами-

ческого равновесия, но и переход процесса в колебательный или «разгонный» режим, грозящий потерей жизнестойкости объекта исследования, нарушением его структурной (системной) целостности. В физическом плане это может означать разгерметизацию, повреждение защитных оболочек, соединительных линий, воспламенение или взрыв рабочих жидкостей и газов, либо останов технологических процессов из-за прекращения химических реакций.

Потеря устойчивости объектами объясняется наличием системоразрушающих факторов, таких как внешние воздействия, развитие дисфункций и возрастание энтропии. Внешние воздействия приводят к разрушению системы в случаях, когда их сила (мощность) превышает силу (мощность) внутренних связей системы. Развитие дисфункций (градиентов, диспропорций) взламывает систему изнутри, а возрастание энтропии происходит из-за дезорганизации внешних воздействий, износа и перерождения связей.

Термин «устойчивость» на сегодня сильно перегружен. Его используют по смыслу в самых разных задачах анализа поведения систем: устойчивости по Ляпунову, условной устойчивости, орбитальной устойчивости, равномерной устойчивости, устойчивости при постоянно действующих возмущениях и других [11]. Обобщение этих методов по группам позволяет выделить два основных направления его применения:

- а) в отношении движения системы на бесконечном промежутке времени;
- б) для выявления качественных изменений в траектории движения, при нарушениях структуры самой системы.

В классических работах по теории устойчивости анализируются возмущения, возникающие в начальном состоянии системы или на ее внешнем входе, а в современных работах – возмущения в структуре самой системы. Цель анализа в обоих случаях одна и та же – будет ли поведение объекта исследования существенно меняться в результате возникновения нежелательных, неизвестных или незапланированных изменений в процессе его нормального функционирования. Нет необходимости подробно и математически строго излагать все результаты, полученные в теории устойчивости [11, 19]. Ограничимся упоминанием только тех из них, которые наиболее показательны для понимания задач теории безопасности.

Классическая теория устойчивости А.М. Ляпунова, А. Пуанкаре и других ученых посвящена изучению равновесных состояний систем и динамике их поведения в малой окрестности этих состояний, что особенно важно для потенциально опасных производств, то есть задачам, в которых движение системы происходит в результате изменения факторов внешней среды, а не самой системы. Для этого используется дифференциальная модель вида

$$x' = f(x, t); \quad x(t_0) = x_0, \quad (3)$$

где  $x$  – переменная состояния;  $x_0$  – начальное состояние системы в момент времени  $t = t_0$ . По определению, данному А.М. Ляпуновым, решение  $x_0(t)$ ,

$t \in [t_0, \infty]$  системы (3) называется устойчивым по отношению к возмущению начальных условий, если по заданному  $\varepsilon > 0$  можно найти такое  $\delta > 0$ , что если для рассматриваемых возмущений  $x(t_0)$  в начальный момент времени  $t_0$  справедливо неравенство  $|x(t_0) - x_0(t_0)| < \delta$ , то при всех  $t \geq t_0$  выполняется следующее условие:  $|x(t) - x_0(t)| < \varepsilon$ . Более сильное определение устойчивости, а именно асимптотической, отвечает требованию

$$|x(t) - x_0(t)| \rightarrow 0, \text{ при } t \rightarrow \infty,$$

что означает возвращение системы к точке равновесия на достаточно большом промежутке времени.

С понятием устойчивости по Ляпунову связан, например, раздел механики деформируемого твердого тела, названный устойчивостью упругих систем [20]. Для теории безопасности привлечение методик анализа устойчивости упругих систем полезно тем, что с их помощью находится область в пространстве параметров и внешних воздействий, в пределах которой рассматриваемое состояние равновесия (движения) остается устойчивым, а поверхность, ограничивающая область устойчивости, именуется критической поверхностью, за пределы которой не следует заходить.

Задачи устойчивости упругих систем имеют большое прикладное значение: потеря устойчивости элементов конструкций, машин и приборов приводит к утрате несущей способности или нарушению нормативных условий эксплуатации.

Общей особенностью классических понятий устойчивости является то, что они, во-первых, применимы к системе конкретного типа, а, во-вторых, к поведению ее траекторий на бесконечном времени в окрестности точки равновесия (притяжения или отталкивания). И прежде чем использовать какие-либо классические результаты, необходимо рассчитать все точки равновесия для функции  $f$ , что может представлять достаточно сложную вычислительную задачу.

Современные взгляды на теорию устойчивости связывают с понятием «грубых систем» или со структурной устойчивостью [11, 21], где основной задачей является определение качественных изменений в траектории движения при нарушениях структуры (параметров) самой системы. В задачах теории безопасности анализ структурной устойчивости объектов исследования полезен в ситуациях нестационарного изменения параметров в условиях нормального функционирования (таких как коэффициенты теплопередачи, активность катализатора, площадь отверстий и т.д.). При этом возможны радикальные изменения фазовых траекторий движения объекта, приводящие к аварийным режимам.

Систему (3) называют структурно устойчивой, если топологический характер траекторий всех «близких» к ней систем остается таким же, как и у системы (3). То есть, при малом возмущении «грубой системы» сохраняется система, эквивалентная исходной по всем своим топологическим свойствам. Она структурно устойчива в том смысле, что качественный характер положения равновесия (узел, фокус) сохраняется при малых дефектах, возникающих в структуре системы. Определенные затруднения для исследователей может вызывать понятие «близости» возмущенной и невозмущенной систем и конкретизация смысла эквивалентности траекторий.



К концепции структурной устойчивости близка теория бифуркации и ее современная разновидность – теория катастроф [22–25, 51]. Термин «бифуркация» (раздвоение) применим к ситуации, когда объект исследования зависит от некоторого, в общем случае векторного параметра  $a$ , и в любых окрестностях конкретного его значения  $a_0$  (бифуркационное значение или точка бифуркации) исследуемые качественные свойства объекта оказываются неодинаковыми для всех  $a$  [11]. При анализе бифуркаций предполагается, что динамика системы зависит от ее параметров:  $f = f(x, t, a)$ , где  $a$  – вектор параметров и исследуется характер положений равновесия при их изменении. Так, например, из равновесного состояния возможно рождение периодических решений, именуемое бифуркацией рождения цикла [25].

Теория катастроф изучает условия, при которых изменение параметров системы вызывает перемещение исходной точки в фазовом пространстве из области притяжения к заданному положению равновесия, в область притяжения к другому положению равновесия, а значит к резким качественным изменениям в динамике системы. Теория катастроф, используя статичное геометрическое описание изменений областей притяжения, определяет, какие области в пространстве входных переменных могут привести к их смещению.

Подчеркивая очевидную плодотворность идей теории устойчивости в анализе проблем безопасности объектов, отметим следующее:

1) в целях упрощения применения результатов классической теории устойчивости на практике разработаны удобные матричные и частотные критерии устойчивости: Рауса–Гурвица, Лъенара–Шипара, Найквиста, Михайлова и др. [26];

2) нельзя забывать, что нестабильное поведение системы может быть вызвано и внезапным отказом ее элементов;

3) проблемы «практической стабильности» макросистем сегодня нуждаются в разработке новых подходов к оценке допустимых границ траекторий их движения на конечном отрезке времени [27].

Анализ системы на устойчивость может привести исследователя к некоторым очевидным выводам, а именно движение системы:

1) устойчиво по всему спектру и диапазону известных заранее внутренних и внешних воздействий (опасностей, угроз);

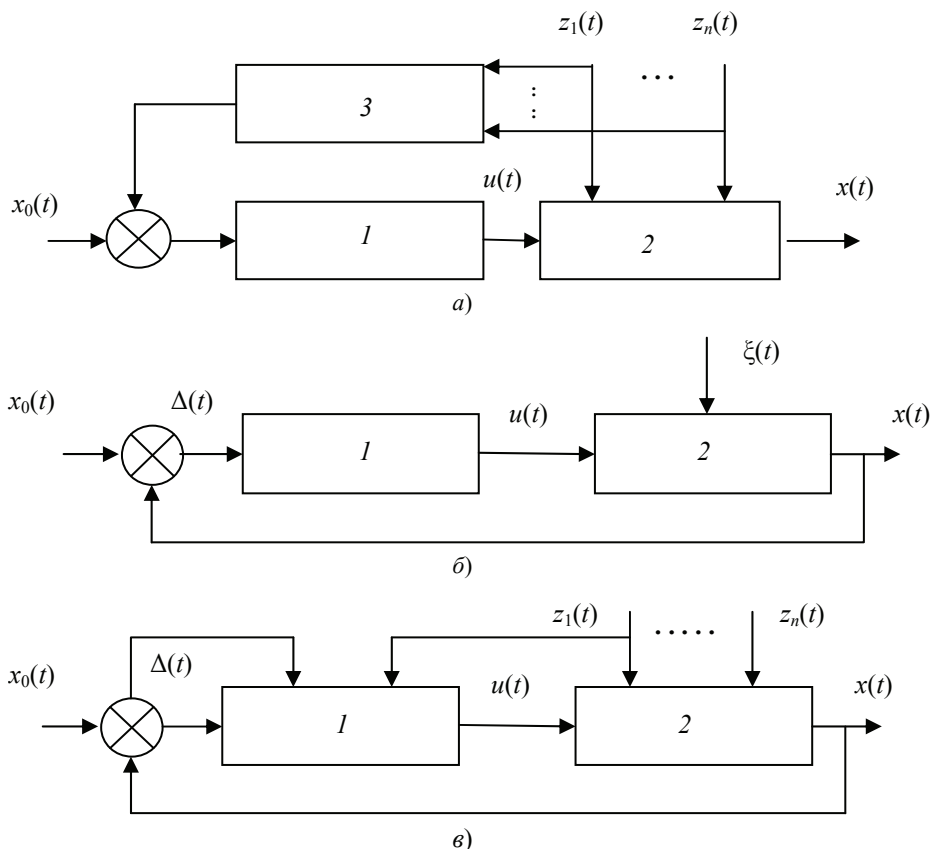
2) неустойчиво при аналогичных условиях;

3) неустойчиво при определенных сочетаниях внутренних и внешних воздействий как по уровню, так и по спектру.

Традиционный подход к решению проблем стабилизации движения заключается в использовании функции управляющих воздействий  $u(t)$  в модели (2) и организации систем управления типа «объект–регулятор». Не вдаваясь в глубокую математическую сущность процесса стабилизации, отметим, что знание принципов и законов управления, даже в концептуальном плане, полезно для теории безопасности при создании систем защиты объектов от внутренних и внешних угроз. Дело в том, что сущность проблем теории безопасности связана с внезапным стечением роковых

обстоятельств, способных привести к потере стабильности, а затем – к разрушению объекта, гибели людей и другим тяжелым последствиям. Эти обстоятельства иногда ожидаемы и предсказуемы, а чаще всего случайны. Методы теории управления и диагностики состояния объектов [28, 29] разработаны как раз для обеспечения стабильного их функционирования в условиях постоянно действующих случайных помех. Для этого используются три вида классических схем: разомкнутая, замкнутая и комбинированная (рис. 3). Разомкнутая система используется в случаях, когда внешние возмущения (опасности, угрозы)  $z_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$  могут быть точно измерены. Регулятор  $I$  вырабатывает управляющее воздействие  $u(t)$ , компенсирующее влияние внешних возмущений. В этих системах можно добиться полной инвариантности от внешних опасностей и угроз, однако, такие системы управления (защиты) неприменимы для неустойчивых объектов.

Замкнутая система управления работает по отклонению  $\Delta(t)$  переменных состояния  $x(t)$  от заданных значений  $x_0(t)$ . Используя  $\Delta(t)$  регулятор  $I$  формирует по определенному закону управляющее воздействие  $u(t)$ . В процессе управления реализуется принцип отрицательной обратной связи.



**Рис. 3. Классические схемы управления объектами с различными системами управления:**

$a$  – разомкнутая;  $б$  – замкнутая;  $в$  – комбинированная;  
 $I$  – регулятор;  $2$  – объект управления;  $3$  – измерительное устройство

При этом нет необходимости в точном знании опасностей, угроз  $\xi(t)$ , поскольку отрицательная обратная связь в силу универсальности скомпенсирована  $\Delta(t)$ , вне зависимости от природы  $\xi$ . Данная система управления (защиты) применима для работы с неустойчивыми объектами, так как стабилизирует систему «объект–регулятор» посредством фактического изменения динамики самой системы.

В комбинированной системе управления используются одновременно принципы управления «по отклонению» и «по возмущению». Идея комбинированного управления распространяется на ряд больших и сложных систем управления, в которых можно выделить детерминированную часть, поддающуюся детальному анализу, расчету и жесткому планированию, и недетерминированную, для которой такой анализ практически невозможен.

Типовые схемы автоматического управления широко используются при создании систем защиты потенциально опасных технологических процессов [30, 31]. При определенных условиях, возникающих вследствие нарушения требований регламента, такие процессы выходят в аварийные режимы с последствиями различной степени тяжести.

Обсуждавшееся ранее явление бифуркации также может быть взято под контроль системами автоматического управления. Например, в [32] рассматривается задача о нахождении такого закона управления с обратной связью  $u(t) = u(x(t))$ , при котором нелинейная система

$$x' = f(x, u, a); \quad x(t_0) = x_0, \quad (4)$$

независимо от значений вектора параметров  $a$  не будет иметь точек бифуркации.

Более сложная проблема в организации систем безопасности объектов – проектирование регуляторов, не позволяющих корням характеристического уравнения линеаризованной системы пересекать мнимую ось в плоскости комплексной переменной, обеспечивая при этом стабильность ее работы. Явный интерес для задач теории безопасности имеют научные работы по поиску законов управления с обратной связью, которые гарантировали бы глобальную устойчивость системы при любых ограниченных возмущениях. Так, например, в работе [33] рассматривается линейная динамическая модель вида

$$x' = Ax + Bu + Cz; \quad x(t_0) = x_0, \quad (5)$$

где  $u$  –  $n$ -мерный вектор управлений;  $z$  –  $l$ -мерный вектор возмущений;  $A$ ,  $B$  и  $C$  – матрицы с постоянными коэффициентами. Если матрица  $A$  устойчива и для возмущаемых элементов матриц  $A$  и  $B$  известны только верхние и нижние границы их значений, тогда можно найти закон обратной связи  $u(x)$  такой, что система (5) становится асимптотически устойчивой при любых ограниченных по величине неопределенностях в матрицах  $A$ ,  $B$  и ограниченных возмущениях  $z$ .

Параллельно с организацией систем безопасности объектов на основе идей теории автоматического управления существует и другой научный подход. Он связан с повышением надежности функционирования объектов. Основой для этого подхода является теория надежности. Ее смысл

состоит в том, чтобы на этапе проектирования технологических процессов и производств учесть, по возможности, условия их эксплуатации и выбрать такие инженерные решения, которые обеспечивают сохранность на выбранном интервале времени значений всех параметров, характеризующих способность объекта исследования выполнять предписанную ему функцию в заданных режимах и условиях работы, технологического обслуживания и транспортирования [50]. К параметрам, характеризующим способность выполнять требуемые функции, относят кинематические и динамические характеристики, показатели конструкционной прочности и точность функционирования, производительности, скорости и т.п.

Теория надежности представляет собой совокупность математических методов, на основе которых разрабатываются:

- способы расчета надежности технологических систем;
- оценки надежности создаваемой продукции;
- способы оптимизации и повышения эффективности функционирования сложных технологических систем и их элементов в процессе эксплуатации.

Под словом «надежность» понимают, прежде всего, такие характеристики, как безотказность, долговечность и ремонтпригодность. Основным понятием теории надежности является отказ – постепенная или внезапная утрата системой работоспособности, в результате ухода ее рабочих характеристик за допустимые пределы. Для расчета показателей надежности используются разнообразные математические методы, особое место среди которых занимают теория вероятностей и математическая статистика. Это обусловлено тем, что события, описывающие количественные и качественные показатели надежности, по своей природе случайны. Предполагается, что состояние объекта исследования определяется многомерной точкой  $x$  в фазовом пространстве  $X$ , а эволюция состояния  $x$  во времени описывается случайным процессом  $x(t)$ . В  $X$  выделяется подмножество опасных состояний  $X_0$ , соответствующих наступлению отказа.

Для увеличения надежности технических систем используют известные приемы: резервирование, профилактические работы и осмотры, эксплуатацию при пониженных нагрузках и т.д.

Вероятностный подход, несомненно, сближает теорию надежности с теорией безопасности при использовании вероятностных оценок риска и понятия отказа в анализе вероятностных аварийных сценариев поведения объекта методом «дерева отказов» и «дерева событий». Однако для теории вероятностей важна массовость однородных событий [34]. Поэтому теория надежности наилучшим образом подходит для поточных и крупносерийных производств, изготавливающих и эксплуатирующих продукцию в статистически однородных условиях и к совокупности которых применимо статистическое истолкование вероятности.

Ограничения в применении теории надежности связывают и с тем, что изначально она занималась анализом достаточно простых систем типа клапан, контакт, заслонка и других, имеющих бинарные состояния: есть отказ – нет отказа. А в сложных системах отказы отдельных элементов не всегда приводят к отказу всей системы, и более того, у сложных систем

есть множество состояний: динамическое равновесие, переходный процесс, адаптация к изменениям, опасные и критические ситуации. Добавим, что теория надежности строилась для систем, в которых отсутствовал «человеческий фактор», и только впоследствии возникли попытки его учета [35].

Теория надежности рассматривает множество возможных состояний функционирования объекта: исправное; неисправное; работоспособное; неработоспособное; предельное. Критерием предельного состояния объекта (при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно) выступает признак или совокупность признаков, установленных нормативно-технической и/или конструкторской документацией. Важность понятия предельного состояния для задач теории безопасности совершенно очевидна, так как она исследует последствия (потери, ущерб) от нахождения объекта именно в этом состоянии.

В принципе цели теории безопасности и теории надежности едины: сохранение жизнеспособности объекта исследования при наименьших затратах и потерях. Для достижения их теория надежности использует вероятностные оценки пребывания объекта в перечисленных выше состояниях и пытается с привлечением системного подхода установить требования к надежности элементов и подсистем на основе требований к надежности объекта в целом. Теория безопасности и риска представляет собой совокупность научных знаний, закономерностей, методов и принципов исследований, терминов и определений в области риска и безопасности, позволяющих количественно и качественно анализировать, определять и назначать показатели и критерии защищенности от аварий и катастроф [7, с. 126].

Попытаемся перечислить те позиции, на которые претендует теория безопасности:

1) наличие опасностей, угроз признается ею как объективная реальность окружающего нас мира;

2) аварийные ситуации в макросистемах неизбежны, а поэтому используется концепция «приемлемого риска», «фоновые» значения которого нормируются по отраслям хозяйства и сферам человеческой деятельности;

3) теория безопасности как наука оперирует собственным развитым понятийно-терминологическим аппаратом, характеризующим специфику ее исследовательских задач;

4) в целях минимизации последствий от аварий теория безопасности использует универсальные понятия риска и ущерба, расчет которых производит методами имитационного моделирования, логико-вероятностных вычислений и нечетких множеств [5];

5) оценка риска производится не столько детерминированными, сколько вероятностными способами, так как причина отказов на объекте заранее неизвестна, и ее считают случайной;

6) сознавая неполноту информации о причинах и динамике развития аварийных ситуаций, теория безопасности уделяет повышенное внимание

их профилактике: экспертному оцениванию опасностей на объекте (методики Доу Кемикал [36], Монда [37] и др.), политике работы с потенциально опасными производствами (методики HAZOP, HRA и др. [10]), совершенствованию законодательства в сфере предотвращения аварий и катастроф [38] и экологии [39];

7) отличительной чертой работ в сфере безопасности является необходимость в прогнозах поведения объекта исследования с использованием экспертных систем, поскольку ведущим принципом результативности работ является принцип «предвидеть и предупреждать»;

8) исследование аварийных обстоятельств проводится по схеме: источники опасностей, угроз → возможное поведение объекта → границы устойчивости → аварийная ситуация → ущерб → оценка риска → оптимизация средств защиты → принятие решений. Каждый из этих этапов вполне может рассматриваться и как самостоятельный в задаче создания эффективной системы защиты объекта исследования от внутренних и внешних опасностей, угроз;

9) при поиске оптимальных средств защиты объектов решаются одно- и многокритериальные задачи с вероятностными или размытыми целевыми функциями и детерминировано-вероятностными ограничениями;

10) монетарную оценку ущербов по приемлемому риску предлагает компенсировать в результате использования страховых фондов;

11) для реализации всех вышеназванных задач исследования теория безопасности использует весь арсенал методов и средств, предлагаемых близкими по целям и задачам науками, в особенности рассмотренными нами.

Поскольку методологическая база теории безопасности находится в стадии бурного развития и не всегда удается все своевременно осмыслить, уместно сделать ряд замечаний. Во-первых, понятийно-терминологический аппарат теории безопасности до конца не отшлифован, о чем свидетельствуют различия в толковании таких ее терминов, как опасность, безопасность, угроза, риск и др. [2, 10, 40–42]. Во-вторых, проверка точности аварийных прогнозов невозможна на реальном объекте исследования, а только в лабораторных условиях – на фрагментах и макетах. Отсюда под вопросом стоит результативность мер защиты объектов от опасностей, угроз. В-третьих, исследование вероятностной модели риска как единичного или редкого (маловероятного) события ставит под сомнение достоверность результатов и выводов, сделанных на ее основе. В-четвертых, применение вероятностных подходов обязывает исследователя быть корректным как в отношении предпосылок и аксиом, положенных в их основу, так и при интерпретации результатов, полученных с их участием. Остановимся подробнее на этом замечании. Как отмечалось выше, использование методов теории вероятностей имеет дело не с любыми случайными экспериментами, а лишь с теми, которые обладают свойством статистической устойчивости. Данное обстоятельство требует от каждого исследователя проверки статистической устойчивости (однородности). Между тем известно, насколько такая проверка затруднительна и неполна [43]. Далее, при применении методов типа «деревья отказов» и «деревья событий»

используются условные, а не истинные вероятности, где условием является факт наступления события-аварии. В этом случае вопрос о статистической устойчивости событий становится еще более актуальным. Только экспериментальная проверка устойчивости частот может показать, так ли устроено изучаемое явление на самом деле. В-пятых, по итогам расчета рисков обычно ставится и решается задача оптимального выбора (организации) системы защиты объекта. Поскольку расчет потерь или ущербов, получаемых в результате анализа возможной аварии, основывается на использовании вероятностного закона, то естественно, что прогноз последствий приобретает вероятностный характер. По сути, мы находим вероятности событий, а не сами события. Затем значения вероятностей (риска) используются в задаче оптимизации, и в результате ее решения находятся варианты систем защиты объекта, наилучший из которых по тем или иным соображениям выбирает лицо, принимающее решения (риск-менеджер). В итоге исходная вероятностная задача незаметно трансформируется в жестко детерминированную. А поскольку вероятностные законы несводимы к законам жесткой детерминации [44], налицо некорректная ситуация, с которой специалистам по теории безопасности необходимо разобраться. В-шестых, теория безопасности разрабатывает собственный класс оптимизационных задач, именуемых многокритериальными [45], в которых значения локальных критериев (рисков) содержат погрешности и неопределенности, а каждый из них принадлежит случайному многомерному распределению вероятностей. Такой класс задач ранее никогда не рассматривался [46], а сегодня имеет большую научную и практическую значимость.

Резюмируя все вышесказанное, можно констатировать, что теория безопасности как наука, уже обладает прочной методологической базой, сформированной на знаниях математики, кибернетики, теории прочности, надежности, теории управления, сопромата, физики твердого тела и целого ряда других естественнонаучных и инженерных дисциплин. Следует ожидать, что фундаментальные исследования в области безопасности будут связаны:

- 1) с дальнейшим совершенствованием понятийно-терминологического и правового обеспечения работ по теории безопасности;
- 2) развитием теории «технологических вирусов», способных разрушить работу макросистем по причине накопления в них микроповреждений (ростом трещин, потерей эластичности, ухудшением качества уплотнений, накоплением осадков и др.);
- 3) созданием научно обоснованных методик анализа поведения объектов в обстановке внутренних и внешних воздействий, определением границ их устойчивости и материальной прочности;
- 4) проектированием интеллектуальных систем защиты объектов от опасностей, угроз неопределенного вида, с последующей их идентификацией;
- 5) разработкой комплекса оптимизационных задач, адекватных информационному обеспечению объектов исследования;
- 6) научным обоснованием страхования ущербов, причиняемых жизни и здоровью людей в промышленных и бытовых условиях.

### *Список литературы*

1. Научная основа стратегии устойчивого развития Российской Федерации / под ред. М.Ч. Залиханова, В.М. Матросова, А.М. Шелехова. – М. : Изд. Гос. Думы, 2002. – 392 с.
2. Русак, О.Н. Давно пора / О.Н. Русак // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 5. – С. 64.
3. Козьянов, А.Ф. История становления дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» / А.Ф. Козьянов, В.С. Ванаев // Безопасность в техносфере. – 2009. – № 4. – С. 60–68.
4. Богуславский, Е.И. Этапы становления и развития знаний о безопасности / Е.И. Богуславский, Н.Е. Богуславский // Безопасность в техносфере. – 2006. – № 2. – С. 60–64.
5. Анализ риска и проблем безопасности : в 4 ч. Ч. 3. Основы анализа и регулирования безопасности / науч. рук. К.В. Фролов. – М. : Знание, 2007. – 816 с.
6. Ярочкин, В.И. Теория безопасности / В.И. Ярочкин, Я.В. Бузанова. – М. : Академический проект ; Фонд «Мир», 2005. – 176 с.
7. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ рисков и проблем безопасности : в 4 ч. Ч. 4. Разд. 8. Научно-методическая база анализа риска и безопасности / науч. рук. К.В. Фролов. – М. : Знание, 2007. – 864 с.
8. Тарасова, Н.П. Рисковая коммуникация в современном обществе / Н.П. Тарасова, А.Е. Курочкина, А.В. Мозговая // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 1. – С. 5–10.
9. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности: в 4 ч. Ч. 1. Основы анализа и регулирования безопасности / науч. рук. К.В. Фролов. – М. : Знание, 2006. – 640 с.
10. Девислов, В.А. Понятийно-терминологический аппарат в области безопасности / В.А. Девислов // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 4. – С. 3.
11. Математическая энциклопедия : в 5 т. / гл. ред. И.М. Виноградов. – М. : Сов. энцикл., 1984. – 5 т.
12. Николаев, В.И. Системотехника: методы и приложения / В.И. Николаев, В.М. Брук. – Л. : Машиностроение, 1985. – 199 с.
13. Клир, Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач : пер. с англ. / Дж. Клир. – М. : Радио и связь, 1990. – 544 с.
14. Попков, Ю.С. Элементы теории макросистем и ее приложения / Ю.С. Попков // Тр. I Всесоюз. шк.-семинара. – М., 1986. – С. 4–19.
15. Попов, Н.С. Моделирование и управление природо-промышленными системами / Н.С. Попов // Малоотходные и безотходные технологии – главный фактор охраны окружающей среды : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. – М., 1983. – Ч. 1 – С. 68–69.
16. Яйли, Е.А. Системный подход к управлению экологическими рисками / Е.А. Яйли, А.А. Музалевский // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 1. – С. 18–24.



17. 25 лет – от идей до технологий : сб. науч.-техн. тр. / под ред. М.А. Шахраманьян. – М. : ИИЦ ВНИИ ГОЧС, 2001. – 399 с.
18. Теория систем в приложении к проблемам защиты окружающей среды / под ред. С. Ринальди. – Киев : Вища школа, 1981. – 264 с.
19. Младов, А.Г. Системы дифференциальных уравнений и устойчивость движения по Ляпунову / А.Г. Младов. – М. : Высш. шк., 1966. – 224 с.
20. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. – 2-е изд. – М. : Наука, 1967. – 984 с.
21. Андронов, А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М. : Физматгиз, 1959. – 915 с.
22. Томпсон, Дж. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике : пер. с англ. / Дж. Томпсон. – М. : Мир, 1985. – 254 с.
23. Гилмор, Р. Прикладная теория катастроф : в 2 кн. : пер. с англ. / Р. Гилмор. – М. : Мир, 1984. – 2 кн.
24. Арнольд, В.И. Теория катастроф / В.И. Арнольд. – М. : Наука, 1990. – 128 с.
25. Марсден, Дж. Бифуркация рождения цикла и ее приложения : пер. с англ. / Дж. Марсден, М. Мак-Кракен. – М. : Мир, 1980. – 367 с.
26. Чернецкий, В.И. Математические методы и алгоритмы исследования автоматических систем / В.И. Чернецкий, Г.А. Дидук, А.А. Потапенко. – Л. : Энергия, 1970. – 374 с.
27. Dichovicni, D. Decision Making in Process Safety CISAP4 proceedings [Электронный ресурс] / D. Dichovicni, M. Medenica // 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Safety & Env. in Process Industry, 14–17 March 2010, Florence, Italy. – Режим доступа : <http://www.aidic.it/CISAP4/webpapers/23Dihovicni.pdf>. – Загл. с экрана.
28. Автоматизация производства и промышленная электроника : в 4 т. / Под общ. ред. А.И. Берга, В.А. Трапезникова. – М. : Сов. энцикл., 1965. – 4 т.
29. Химмельблау, Д. Обнаружение и диагностика неполадок в химических и нефтехимических процессах / Д. Химмельблау. – Л. : Химия, 1983. – 352 с.
30. Обновленский, П.А. Системы защиты потенциально опасных процессов химических технологий / П.А. Обновленский, Л.А. Мусьяков, А.В. Чельцов. – Л. : Химия, 1978. – 224 с.
31. Chou, J. Hazardous Gas Monitors. A practical Guide to Selection, Operation and Applications / J. Chou. – New York : Mc Graw-Hill Book Company, 2000. – 259 p.
32. Касти, Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы / Дж. Касти. – М. : Мир, 1982. – 216 с.
33. Gutman, S. Stabilizing Feedback Control for Dynamical Systems with Bounded Uncertainty / S. Gutman, G. Leitmann // Proceedings of the IEEE Conf. on Decision and Control and the 15th Symposium on Adaptive Processes, Clearwater, Fla., 1976 / Inst. Electr. Electron. Engrs. – New York, 1976. – P. 94–99.
34. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей : учеб. для вузов / Е.С. Вентцель. – 3-е изд. испр. – М. : Наука, 1964. – 576 с.

35. Кузьмин, И.В. Элементы вероятностных моделей автоматизированных систем управления / И.В. Кузьмин, А.А. Явна, В.И. Ключко. – М. : Сов. радио, 1975. – 336 с.
36. Попов, Н.С. Оценка уровня пожаро- и взрывоопасности промышленных объектов. Методика. Программа. Примеры : монография / Н.С. Попов, В.А. Лузгачев, Н.В. Лузгачева. – Тамбов ; М. ; СПб. ; Баку ; Вена : Нобелистика, 2009. – 104 с.
37. ICI (Imperial Chemical Industries) (1985). The Mond Index. 2nd edition. ICI PLC. Explosion Hazards Section. Technical Department. Winnington. Northwick. Cheshire W8 4DJ. England.
38. Политика предотвращения аварий и катастроф / под ред. М.И. Фалеева – М. : Ин-т риска и безопасности, 2002. – 316 с.
39. EU Environmental Policy Handbook. A Critical Analysis of EU Environmental Legislation / Ed. by Stefan Scheuer // European Environmental Bureau (EEB), September 2005 / Brussels. – Belgium, 2005. – P. 344.
40. Чура, Н.Н. Безопасность: отдельные аспекты основ понимания и характеристик / Н.Н. Чура // Безопасность в техносфере. – 2008. – № 3. – С. 52–56.
41. Чижиков, Ю.В. О терминах безопасности жизнедеятельности / Ю.В. Чижиков // Безопасность в техносфере. – 2008. – № 3. – С. 62–63.
42. Попов, Н.С. О некоторых результатах семантического анализа терминов теории безопасности / Н.С. Попов, Н.В. Лузгачева, В.А. Лузгачев // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. – 2010. – № 4–6(29). – С. 30–38.
43. Тутубалин, В.Н. Теория вероятностей : крат. курс и науч.-метод. замеч. / В.Н. Тутубалин. – М. : Изд-во Моск. гос. ун-та, 1972. – 230 с.
44. Кравец, А.С. Природа вероятности (Философские аспекты) / А.С. Кравец. – М. : Мысль, 1976. – 173 с.
45. Модели и методы векторной оптимизации / С.В. Емельянов [и др.] // Итоги науки и техники. Техн. кибернетика. – М., 1973. – Т. 5. – С. 386–448.
46. Попов, Н.С. К теории принятия решений в экологии / Н.С. Попов, А. Хайри, Т.А. Хвостова // Междунар. образование, ноосферология и устойчивое развитие : мат. междунар. науч. конф., 5–6 июня 2008 г. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2008. – С. 212–216.
47. Окоороков, В.Р. Надежность производственных систем / В.Р. Окоороков. – Л. : Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1972. – 167 с.
48. Можаяев А.С. Прикладные вопросы анализа рисков критически важных объектов / А.С. Можаяев. – М. : Знание, 2007. – 816 с.
49. Алымов, В.Т. Анализ техногенного риска / В.Т. Алымов, В.П. Крапчатов, Н.П. Тарасова. – М. : Круглый год, 2000. – 160 с.
50. Червоный, А.А. Надежность сложных систем / А.А. Червоный, В.И. Лукьященко, Л.В. Котин. – М. : Машиностроение, 1976. – 288 с.
51. Хэссард, Б. Теория и приложения бифуркации рождения цикла : пер. с англ. / Б. Хэссард, Н. Казаринов, И. Вэн. – М. : Мир, 1985. – 280 с.

52. Ростопшин, Ю.А. Системный подход в исследованиях экоразвития. Прикладные проблемы управления макросистемами / Ю.А. Ростопшин // Тр. I Всесоюз. шк.-семинара. – М., 1986. – С. 100–115.

53. Энциклопедия кибернетики. В 2 т. – Киев : Гл. ред. Укр. Сов. Энцикл., 1975. – 2 т.

54. Тарасова, Н.П. Рисковая коммуникация в современном обществе / Н.П. Тарасова, А.Е. Курочкина, А.В. Мозговая // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 2. – С. 5–10.

---

## **Methodological Grounds of Security Theory**

**N.S. Popov, N.V. Luzgacheva, A. Khairi**

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key words and phrases:** methodology; scientific grounds; security theory; theoretical basis.

**Abstract:** The given paper presents the security science as an independent field of study based on the achievements of the earlier sciences which have similar methods and objectives. The problems and interests are outlined; the tasks which it is supposed to solve are identified.

---

© Н.С. Попов, Н.В. Лузгачева, А. Хайри, 2010