

РАЗРАБОТКА СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Н. С. Попов¹, О. В. Пещерова¹, Л. Н. Чуксина²

*Кафедра «Природопользование и защита окружающей среды»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), г. Тамбов, Россия; eco@nnn.tstu.ru;
кафедра зарубежной филологии и прикладной лингвистики,
ФГБОУ ВО «ТГУ имени Г. Р. Державина» (2); г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: задачи управления развитием; методология; моделирование; природо-промышленные системы; системный подход; устойчивое развитие; учение В. И. Вернадского.

Аннотация: Беспрецедентный рост мировой экономики и негативные тенденции ее глобализации стали причинами повсеместного разрушения природных систем, являющихся основой жизни для всего человечества. Плодотворная деятельность ООН и других ведущих международных организаций способствовала привлечению внимания ученых к исследованию и решению возникшей проблемы, серьезность и сложность которой не вызывает сомнений. В настоящее время эта проблема охарактеризована как проблема устойчивого развития цивилизации.

Предложена методология решения прикладных задач устойчивого развития, основанная на идеях системного подхода, позволяющего использовать конструктивные инженерные методы экологизации экономики и общества. Один из примеров применения методологии связан с реконструкцией городской станции очистки сточных вод.

Введение

В 1940-х годах академик Российской академии наук В. И. Вернадский опубликовал две фундаментальные философские работы – «Биосфера и ноосфера» и «Несколько слов о ноосфере» [1, 2], в которых проанализировал историю и причины эволюции биосферы как естествоиспытатель и на основе множества эмпирических фактов и логических выводов пришел к заключению о неизбежном начале новой эры в жизни земной цивилизации, связанной с переходом биосферы в качественно новое состояние – ноосферу (сферу разума). Реальность грядущих перемен ученый объяснил следующим образом: «Основной геологической силой, создающей ноосферу, является рост научного знания <...> изменение биосферы происходит независимо от человеческой воли, стихийно, как природный естественный процесс <...> он (человек) может и должен перестраивать своим трудом и мыслью область своей жизни, перестраивать коренным образом по сравнению с тем, что было раньше» [2].

Масштабы роста народонаселения на планете достигли такого уровня, при котором его жизненные потребности и результаты жизнедеятельности, многократно усиленные техническими возможностями промышленных производств, превратились в факторы тотального разрушения среды обитания, поставив под сомнение способность дальнейшего существования человечества. Создавшуюся

ситуацию можно объяснить тем, что «умение всегда опережало нашу мудрость», тогда как ноосфера подразумевает другую парадигму развития человеческой истории, основанную на интеллекте, знаниях и умениях правильно оценивать риски.

Исключительная важность научного открытия В. И. Вернадского была осознана не сразу из-за сложной политической обстановки, возникшей в мире: Вторая мировая война, смена экономических стимулов, восстановление разрушенных хозяйств и т.п. Только с 1970-х годов мировое научное сообщество под эгидой ООН и при участии Римского клуба (Club of Rome), Банка реконструкции и развития (International Bank for Reconstruction and Development), Международного института прикладного системного анализа (International Institute of Applied Systems Analysis), Института всемирного наблюдения (A World Watch Institute) и ряда других организаций стало систематически отслеживать состояние биосферы, качество жизни населения в разных странах мира, потребление ресурсов планеты, причины возникновения кризисных ситуаций в отношениях природы и общества, и многое другое, в результате чего в политических кругах возникла идея о необходимости взять под контроль ноосферный этап эволюции биосферы, напрямую связав его с проблемой устойчивого развития экономики, природы и общества.

Существуют две группы институтов, продвигающих принципы устойчивого развития в глобальном масштабе. Первая группа – конференции ООН по окружающей среде и устойчивому развитию. Вторая группа институтов устойчивого развития – всемирные саммиты ООН по целям устойчивого развития. Начиная с первой Конференции ООН по окружающей среде (Стокгольм, 1972 г.), организовано немало научных форумов, на которых обсуждалась стратегия движения цивилизации к устойчивому развитию. Среди них наиболее значимыми стали: Конференция ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992 г.), на которой принята «Повестка дня на XXI век», Конференция ООН по окружающей среде и устойчивому развитию (Рио-де-Жанейро, 2012) с обсуждением «зеленой» экономики, устойчивого развития и искоренения бедности, Саммит тысячелетия (Нью-Йорк, 2000 г.) с вошедшей в историю «дорожной картой» управляемого глобального развития, ориентированного на «Цели развития тысячелетия», Генеральная Ассамблея ООН 2015 г. с программой «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года». Заметим при этом, что мощным стимулом для организации форумов по устойчивому развитию стал доклад Римского клуба – «Пределы роста» (Limits to Growth) и последовавшие за ним работы. Ключевым вопросом на форумах по устойчивому развитию был и остается вопрос о том, каким образом в условиях возрастающих темпов роста народонаселения, ускоренного потребления невозобновляемых природных ресурсов и образования огромного количества отходов улучшить благосостояние народов в разных по уровню экономического развития странах мира в настоящем и долгосрочном периодах времени.

Ясного ответа на данный вопрос, к сожалению, нет по причине малой изученности крайне сложной проблемы, отсутствия у человечества достаточного практического опыта в ее решении, слабого представления о механизмах выживания биологических видов в изменяющихся условиях и, прежде всего, из-за недостаточно точного определения такого понятия, как «устойчивость» (sustainability). Первоначально определение понятия «устойчивое развитие» сформулировано в известном докладе Комиссии Г. Х. Брундтланд [3] и получило широкое признание среди представителей различных научных направлений [4]. Однако оно оказалось слишком общим, чтобы быть практичным. Поэтому до сих пор нет консенсуса относительно того, что представляет собой устойчивая мировая экономика, как ее создать и какое влияние на современный стиль жизни окажет стратегия устойчивого развития. При этом устойчивость носит двойственный характер – экологический и социальный, один из которых можно назвать «экоэффективностью», дру-

гой – «экосправедливостью». И если первый компонент касается вопросов качества окружающей среды и использования природных ресурсов, то второй – справедливых отношений между поколениями и в рамках одного поколения.

Сложность рассматриваемой социально-экономической и экологической проблемы предполагает участие представителей всех научных школ, способных обосновать компромиссную стратегию устойчивого развития. При этом польза от их коллективного участия очевидна, так как в таком варианте формируется междисциплинарная совокупность знаний, в которой соприкасаются различные точки зрения на проблему, сменяя или дополняя одна другую, что в целом ускоряет процесс поиска взвешенных решений. «Экологическая экономика ... должна расширить свое представление об экономических, социальных, этических, исторических, институциональных, биологических и физических элементах» [5]. Наличие различных мнений не всегда приводит к полному отрицанию каких-либо из них, если только они не являются альтернативными. В экологической экономике сегодня допустим методологический плюрализм [6], связанный с рядом объективных причин [5]:

- слишком рано на сегодня ограничивать чем-либо методологии;
- не существует лучшей методологии для решения проблем;
- многоаспектность в понимании проблемы требует особо тщательного принятия решения на стратегическом уровне, иначе невозможно получить единственное верное решение;
- плюрализм может способствовать биологическому и культурному разнообразию;
- плюрализм может способствовать и полноценному участию, и децентрализации.

Вполне естественно, когда научные школы разрабатывают и представляют свои методологии решения проблемы устойчивого развития, которые в будущем смогут объединяться в единую строгую теорию эволюции биосферы.

Методология системного подхода к решению проблемы устойчивого развития

На данном этапе развития знаний о природе и обществе наиболее продуктивными научными школами, занятыми исследованием особенностей рассматриваемой проблемы, являются неоклассическая, физико-экономическая, инженерно-экологическая и ряд других, базирующихся на идеях антропоцентризма, устойчивого развития, использования новых технологий, оптимизации экстернальных издержек, комплексной переработки сырья и управления экосистемами с учетом свойств их упругости, самоорганизации и гомеостаза. В сферу интересов научных школ попадают и вопросы организации «круговой экономики» [7]. Вследствие множественности результатов, полученных различными научными школами, в науке об устойчивом развитии назрела необходимость в системной организации знаний в виде методологии – учения о принципах, методах, формах и инструментах познания закономерностей процесса коэволюции социально-экономических и экологических систем. Наличие методологии существенно упрощает проведение прикладных исследований. Представленная в работе методология формировалась одновременно и как «путеводитель», и как «конструктор» для решения задач моделирования и управления процессами устойчивого развития, а поэтому является частью более общего системного подхода к исследованию других глобальных биосферных проблем. Ее особенности связаны с единым подходом к анализу процессов «промышленной» и «природной» технологии, с горизонтом задач планирования в 20 и более лет, исследованием природо-промышленных систем различного уровня сложности и поиском компромиссных вариантов их устойчивого развития.



Рис. 1. Блок-схема, иллюстрирующая методологию

В визуальном варианте содержание методологии показано на рис. 1 в форме пирамиды, включающей восемь информационных блоков. Наличие обратных связей в блоках VI – VII подразумевает коррекцию решений, принятых в предшествующих блоках.

Блок I. Фундаментальные основы теории устойчивого развития.

Информация данного блока представляет собой «базу данных, знаний и теорий» о природе и обществе, сформированную по результатам работ исследователей эволюции биосферы. Ее основу составляют: теория естественного отбора Ч. Дарвина, теория эволюции В. И. Вернадского, работы ученых Римского клуба и международных научных школ, включая решения конференций ООН по окружающей среде и развитию, а также ранее известные и современные философские учения в эколого-экономической и социальной сферах [8].

Подробнее рассмотрим теорию эволюции В. И. Вернадского, ставшую предметом проблемы устойчивого развития. Согласно его учению эволюция Земли осуществляется при непосредственном участии биогеохимической функции «живого вещества» (Living Matter – **LM**), в связи с чем ученым были сформулированы три биогеохимических принципа, являющихся эмпирическим обобщением сведений о состоянии биосферы в различных геологических периодах [9]:

принцип 1 – «Биогенная миграция атомов химических элементов в биосфере всегда стремится к максимальному своему проявлению».

принцип 2 – «Эволюция видов в ходе геологического времени, приводящая к созданию форм жизни, устойчивых в биосфере, идет в направлении, увеличивающем биогенную миграцию атомов биосферы».

принцип 3 – «В течение всего геологического времени <...> заселение планеты должно быть максимально возможным для всего живого вещества».

Семантический анализ указанных принципов показал [10], что LM относится к категории целеустремленных систем [11], обладающих целью (максимизации потоков элементов питания и энергии через ткани LM) и способами ее достижения (свободы выбора полезных биогенных веществ). Такое целеустремленное поведение LM в естественных условиях биосферы порождает дефицит ресурсов питания, конкуренцию видов, рост отходов и ухудшение среды обитания, то есть такие результаты, которые являются объектами исследований проблемы устойчивого развития.

На рисунке 2 приведена гипотетическая схема взаимодействия LM (субъект A) с его внешним окружением S, способами действий C_i и их результатами O_i ,

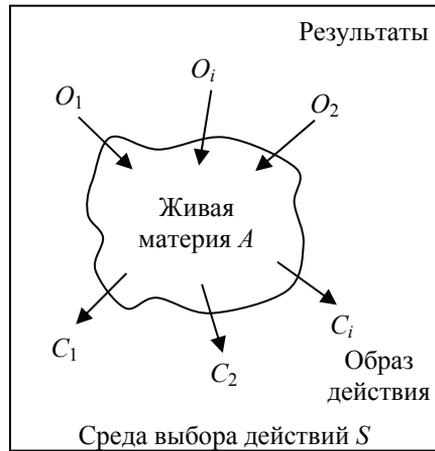


Рис. 2. Концептуальная схема целеустремленного состояния «живого вещества» в собственном окружении

$i = \overline{1, m}$, например, продуктивностью. Обладая определенной свободой поведения, LM осуществляет свой выбор способа действий C_i в окружении S с вероятностью [11]:

$$P_i = P\{C_i | A \text{ в } S\}. \quad (1)$$

При этом эффективность системы действий E_{ij} и удельная ценность V_j результатов O_j в окружении S также оценивается по вероятности:

$$E_{ij} = P\{O_j | A \text{ выбирает } C_i \text{ в } S\}; \quad (2)$$

$$V_j = P\left\{\max_{C_i} O_j | A \text{ выбирает } C_i \text{ в } S\right\}. \quad (3)$$

Из (1) – (3) следует, что эволюционный процесс биосферы, осуществляемый при непосредственном участии LM, в своей сущности является стохастическим, требующим использования соответствующих методов диагностики устойчивости и управления.

В соответствии с первым биогеохимическим принципом и его формализации в выражении (3) модель поведения LM в окружающей среде обитания представлена на рис. 3. На языке математического программирования данный принцип

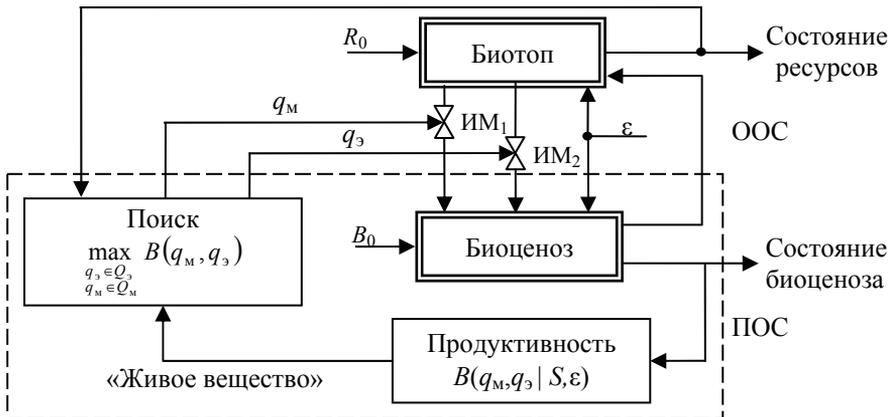


Рис. 3. Кибернетическая модель поведения целеустремленной системы «биотоп – биоценоз» (ИМ – исполнительный механизм)

выглядит следующим образом: биоценозу необходимо найти такие наилучшие значения потоков пищевых элементов q_M^* и энергии q_3^* , при которых его продуктивность B будет максимальной:

$$B(q_M^*, q_3^*) = \max_{\substack{q_3 \in Q_3 \\ q_M \in Q_M}} B(q_M, q_3 | S, \varepsilon), \quad (4)$$

в условиях сложившейся структуры биотопа S и наличия случайных факторов ε , воздействующих на систему «биотоп – биоценоз» и способных повлиять на биогенную миграцию элементов питания и потребления энергии.

Действие первого принципа просматривается и в экономических системах, для которых целевая функция имеет вид

$$\max_{u \in U} (D(u) - P(u)), \quad (5)$$

где $B = D - P$ – прибыль, D – доход, P – потери; $u \in U$ – управляющие воздействия (потоки ресурсов, денежных средств, информации и т.д.).

Особый интерес в системе «биотоп – биоценоз» представляет действие положительных и отрицательных обратных связей: при достаточном количестве ресурсов в биотопе биоценоз увеличивает свою продуктивность по принципу положительной обратной связи (ПОС), а образуемые в процессе «метаболизма» отходы попадают в биотоп и ухудшают его качественные состояния по принципу работы отрицательной обратной связи (ООС). Процесс устойчивого развития системы может регулироваться за счет коррекции ПОС и ООС, то есть контроля за скоростью потребления ресурсов и образования отходов.

Исключительная важность первого принципа В. И. Вернадского для анализа проблемы устойчивого развития состоит в том, что он выражает особый «экспансивный» тип поведения ЛМ в биосфере, способный формировать в процессе эволюции специфичный тип структуры отношений видов в биоценозе (известный как пирамида энергий Р. Линдемана), обладающий устойчивостью развития в геологической истории существования Земли. Нарушение или ограничение данного принципа способно повлиять на эволюционные процессы в биосфере.

В непрерывной истории развития биосферы возникают метастабильные состояния, в которых в результате действия случайных факторов происходят структурные изменения, именуемые эволюцией. Известны два механизма эволюции – адаптационный и бифуркационный. Первый позволяет предсказать возможные последствия развития цивилизации, второй – недетерминированный, для него не ясно, по какому сценарию пойдет дальнейший ход событий. Все будет определять случай в момент возникновения структурной неустойчивости. Принимая во внимание «исключительную» важность случайности для выбора новой структуры системы «биотоп – биоценоз», эволюционный процесс (Evop) формализуем в виде

$$\text{Evop} \triangleq P \left\{ \varepsilon^* \in \Xi \mid S_0(t, \varepsilon^*) \stackrel{\min H}{\Rightarrow} S_k(t) \wedge \theta(S_k(t)) > \theta(S_0(t)) \right\}, \quad (6)$$

где \triangleq – символ «определяется как»; \wedge – логический знак «И»; t – время.

Согласно (6), Evop определяется как вероятность возникновения случайного события ε^* на множестве возможных событий Ξ , при котором в системе со структурой S_0 возникает процесс самоорганизации, направленный на минимизацию энтропии системы H и создание структуры S_k , при этом оценка структурной сложности $\theta(S_k) > \theta(S_0)$. В процессе эволюции система максимизирует контакты с внешней средой, увеличивает свою устойчивость, улучшает понимание внешних условий и повышает управляемость. Данные качества необходимо использовать при решении проблем устойчивого развития.

Что же, в сущности, представляет собой устойчивое развитие? Это ноосферный эволюционный процесс, основу которого составляют биогеохимические функции LM, диалектические законы природы и общества и эффективные, с позиций традиционной теории устойчивости, управленческие решения, принимаемые на длительный период времени в условиях неопределенности.

Блок II. Концептуализация проблемы.

В этом блоке рассматриваются системные принципы, характеризующие наиболее важные особенности восприятия проблемы исследователем. В их числе:

1) комплексное исследование рассматриваемой проблемы на расширенном пространстве переменных состояния природо-промышленных систем (ППС) (англ. Nature-Industrial System – NIS);

2) погружение задач проектирования, модернизации и нормального функционирования производств в класс задач оптимального управления;

3) приоритет социально-экологических закономерностей перед технико-экономическими на этапе формализации задач экологического менеджмента;

4) циклическая воспроизводимость состояний экосистем в контрольные моменты времени;

5) гарантированная экологическая безопасность управленческих решений, принимаемых на короткие и длительные периоды времени;

6) поиск оптимальных решений в условиях неопределенности – на множестве альтернативных целей и состояний функционирования ППС.

Приведенные принципы полезны тем, что выражают «топологические», неизменные особенности системного подхода при решении конкретных задач устойчивого развития.

Блок III. Научная платформа исследования проблемы.

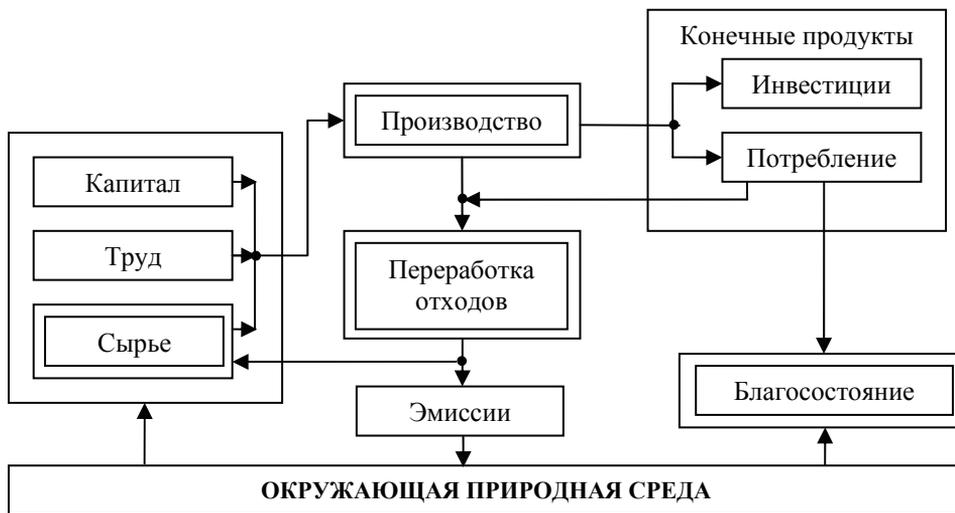
В этом блоке введено и формализовано понятие ППС как единой научной платформы для решения конкретных задач устойчивого развития.

Определение 1. Природо-промышленная система представляет собой множество объектов отраслей промышленного или аграрного хозяйства и объектов природной среды, образующих единую технико-экономическую и экологическую структуру рассматриваемого региона, упорядоченно взаимодействующих друг с другом в процессах обмена информацией, потребления материально-энергетических ресурсов и переработки отходов. В развернутой форме структура макроэкономической ППС показана на рис. 4, а, в формализованном виде – на рис. 4, б, где S_I, S_N означают промышленную и экологическую подсистемы.

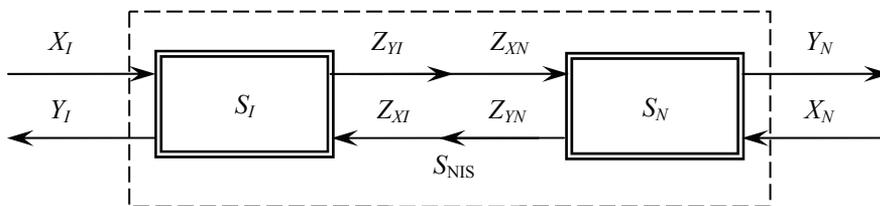
Определение 2. Промышленной подсистемой S_I назовем любой уровень организации технологического производства – от типовых процессов промышленной технологии и локальных систем управления ими до современного предприятия (завода, комбината или производственного объединения), с его инфраструктурой и органами контроля и управления.

Определение 3. Экологической подсистемой S_N назовем любой уровень организации природной среды – от элементарных процессов взаимодействия биологических объектов с физической средой до структуры всего природного комплекса, содержащегося в ППС.

На рисунке 4, б, X_I, X_N представляют соответственно множества внешних воздействий S_I (сырье, энергия, инвестиции и т.д.) и S_N (солнечная энергия, влага, примеси и т.д.); Y_I, Y_N – множества соответственно выходных воздействий S_I (целевые и побочные продукты производства) и S_N (биологические виды, влага, экологические блага и т.д.); $Z_{YI} \equiv Z_{XN}$ и $Z_{YN} \equiv Z_{XI}$ – множества связующих переменных, причем в составе Z_{XN} находятся отходы производства, Z_{XI} – ресурсы. Вполне объективно S_I можно отнести к детерминированному типу систем, S_N – вероятностному, из-за недостатка информации о входных переменных X_N и стохастического характера процессов, происходящих внутри нее.



а)



б)

Рис. 4. Структура ППС в развернутом (а) и формализованном (б) виде

Природо-промышленную систему представим в виде отношения на декартовом произведении

$$S_{NIS} \subset (X_I \times X_N) \times (Y_I \times Y_N), \quad (7)$$

определяемого по формуле $S_{NIS} = \Omega(S_I \circ S_N)$, где знак « \circ » означает операцию последовательного соединения S_I с S_N , Ω – замыкание обратной связи; \times – символ декартова произведения.

Связующие переменные Z_{XN} и Z_{XI} формально выражают уровень экономической активности в S_I и качество природной среды в S_N соответственно. Устойчивость поведения S_{NIS} во времени зависит от действия положительных и отрицательных обратных связей, существующих между S_I и S_N . Бесконтрольная работа обратных связей способна дестабилизировать отношения между подсистемами и привести S_{NIS} к деградации.

Задача системы менеджмента состоит в определении такой траектории движения S_{NIS} , реализация которой гарантирует достижение целевых показателей работы подсистем S_I и S_N на заданном интервале времени в условиях действия предполагаемых возмущающих факторов. При этом устойчивое развитие означает исключение системой менеджмента нежелательных отклонений в траектории движения системы S_{NIS} к поставленным целям.

Природо-промышленные системы относятся к классу термодинамически открытых макросистем с иерархической структурой соединения элементов, детерминированно-стохастической природой процессов, нелинейным характером их

поведения и запаздыванием сигналов в информационно-измерительных каналах связи. На макроуровне S_{NIS} воспринимается как неоднородная, состоящая из несовместимых по своей природе подсистем, требующих разных способов их описания, однако на «процессном уровне», с позиции механики сплошной среды, возможен единый язык описаний S_I и S_N . Для этого введем следующие определения.

Определение 4. Типовой процесс промышленной технологии любого уровня его организации формализуем как физико-химическую систему (**ФХС**), представляющую собой многофазную и многокомпонентную сплошную среду, распределенную в пространстве (в пределах рабочего объема аппарата) и переменную во времени, в каждой точке гомогенности которой и на границе раздела ее фаз происходит перенос массы, энергии, импульса, момента импульса, заряда (электрического, магнитного), при наличии их источников и стоков [14].

Определение 5. Любой процесс «природной» технологии, независимо от уровня его организации, формализуем как биологическую систему (**БС**), представляющую собой биологически активную, многофазную и многокомпонентную сплошную среду, обладающую свойством саморегуляции, распределенную в пространстве (в пределах рассматриваемых границ) и переменную во времени, в каждой точке гомогенности которой и на границе раздела ее фаз происходит перенос массы, энергии, импульса, момента импульса, заряда, при наличии их источников и стоков.

Основываясь на данных определениях, в работе [12] показано, что модель S_{NIS} можно записать следующим образом:

$$\left(\begin{array}{ll} y_I = F_1(r_I, u_I, \xi_I, z_{YI}^A, z_{YN}^B) & y_N^B = \Phi_2(u_N, r_N, \xi_N, z_{YI}, y_N^A) \\ z_{YI} = F_2(r_I, u_I, \xi_I, z_{YN}^A, z_{YN}^B) & z_{YN}^A = \Phi_3(u_N, r_N, \xi_N, z_{YI}, z_{YN}^B) \\ y_N^A = \Phi_1(u_N, r_N, \xi_N, z_{YI}, y_N^B) & z_{YN}^B = \Phi_4(u_N, r_N, \xi_N, z_{YI}, z_{YN}^A) \end{array} \right), \quad (8)$$

где r_I, u_I, ξ_I и r_N, u_N, ξ_N – наблюдаемые управляемые и возмущаемые переменные соответственно в S_I и S_N ; A, B – индексы, обозначающие абиотические и биотические компоненты соответственно; F_1, F_2 – функциональные операторы модели для подсистемы S_I ; $\Phi_1 - \Phi_4$ – операторы подсистемы S_N .

Базовая конструкция модели (8) позволяет формулировать различные варианты задач управления устойчивым развитием S_{NIS} .

Блок IV. Постановка типовых задач устойчивого развития.

Наиболее развитая в настоящее время неоклассическая экономическая теория имеет дело с долгосрочными аспектами экономического развития в рамках теории роста, использующей равновесные сбалансированные траектории движения экономических систем. В качестве критерия выбора оптимальной траектории роста неоклассическая теория использует максимизацию общественного благосостояния, которое ассоциируется, в основном, с потреблением производимых товаров, при этом почти игнорирует природную компоненту (см. рис. 4, а), от которой во многом зависит достижение экономических, экологических и социальных целей. Концепции «слабой», «строгой» и «критической» устойчивости позволяют учесть указанный недостаток в оценке оптимальной траектории роста за счет включения объемов производимой продукции и экологических индикаторов в схему принятия решений [13]. Например, условие «критической» устойчивости выглядит следующим образом:

$$\varphi(X_{t+1}, EQ_{t+1}) \geq \varphi(X_t, EQ_t); \quad (9)$$

$$EQ_t \geq \overline{EQ}, \quad \forall t \in \{1, \dots, \infty\}, \quad (10)$$

где X_t – объем выпуска агрегированной продукции в экономическом секторе хозяйства в период времени t ; EQ_t – индикатор состояния экологического сектора в этом же периоде; φ – векторная функция благосостояния.

Соответствующие условиям (9), (10) траектории устойчивого роста представляют собой монотонно неубывающие функции многих переменных, в которых последующие значения оказываются «лучше» предыдущих в результате эффективной работы системы управления. Типовые классы задач устойчивого развития, использующие условия «критической» устойчивости, приведены в работе [12], в табл. 1 они обозначены буквами А, В, С, ..., Н. Данные задачи обладают различной степенью сложности, в конкретных случаях являясь статическими или динамическими, детерминированными или вероятностными.

Приведем пример постановки задачи класса А. Пусть модель природо-промышленной системы описывается набором уравнений вида (8), где $u_I \in U_I$ и $r_I \in R_I$ – соответственно управляемые и наблюдаемые переменные в S_I ; $u_N \in U_N$ и $r_N \in R_N$ – соответственно управляемые и наблюдаемые переменные в S_N ; y_N^A, y_N^B – соответственно абиотические и биотические переменные в S_N ; Z_{YI}, Y_I – выходные переменные в S_I ; z_{YN}^A, z_{YN}^B – выходные абиотические и биотические переменные в S_N , воздействующие на S_I . Будем считать, что $u_N, r_N, u_I, r_I, y_N^A, y_N^B, z_{YI}, Y_I, z_{YN}^A, z_{YN}^B$ принадлежат к конечномерным векторным евклидовым пространствам $U'_N, R'_N, U'_I, R'_I, Y_N^A, Y_N^B, Z'_{YI}, Y'_I, Z'_{YN}, Z'_{YN}$. Пусть для любого r_I задана система планово-технологических требований, в общем виде представленная таким образом:

$$F(r_I, y_I, u_I) \geq 0; \quad (11)$$

$$G(z_{YI}) \geq 0, \quad (12)$$

где F и G – векторные функции. Формула (11) представляет собой ограничения на качество, плановый выпуск продукции и технико-экономические показатели производства, (12) – санитарно-экологические ограничения на эмиссию технологических и энергетических отходов в окружающую среду.

Таблица 1

Варианты задач устойчивого развития

Классы задач	Характеристика задач
А	Детерминированная, статическая
В	Детерминированная, динамическая
С	Вероятностная, статическая
Д	Детерминированная, с циклическим контролем переменных состояния экосистем
Е	Детерминированная с сезонными изменениями состояний природы и долгосрочным прогнозом переменных состояний экосистем
F	Вероятностная, на множестве возможных состояний функционирования экосистем
G	Вероятностная, на множестве возможных состояний функционирования экосистем и прогноза их состояний в контрольных точках
Н	Вероятностная, на множестве возможных состояний функционирования экосистем и гарантированной экологической безопасностью

Будем считать заданной систему ограничений и условий на экологические показатели в виде

$$H(y_N^A, y_N^B, r_N) \geq 0, \quad (13)$$

где H – векторная функция. Заметим, что в общем случае (13) зависит от входных условий r_N .

Пусть Q – целевая функция, определяемая отображением

$$Q: Y_I \times U_I \times R_I \times Y_N^A \times Y_N^B \times U_N \rightarrow \chi, \quad (14)$$

где χ – множество, в общем случае частично упорядоченное отношением « \geq ».

Будем полагать, что управляющие воздействия u_I и u_N принадлежат некоторым замкнутым областям управления

$$u_I \in U_I(r_I) \subseteq U'_I; \quad (15)$$

$$u_N \in U_N(r_N) \subseteq U'_N, \quad (16)$$

зависящим, в общем случае, от входных возмущений r_I и r_N соответственно.

Задача А при этих обозначениях формулируется следующим образом.

Для заданных r_I и r_N найти такие управляющие воздействия $u_I^* \in U_I(r_I) \subseteq U'_I$ и $u_N^* \in U_N(r_N) \subseteq U'_N$, при которых выполняются ограничения (11) – (13), условия (8) и для всех $u_I \in U_I(r_I)$ и $u_N \in U_N(r_N)$, при которых выполняются (8) и (11) – (13):

$$Q(y_I^*, u_I^*, r_N, y_N^{*A}, y_N^{*B}, u_N^*) \geq Q(y_I, u_I, r_N, y_N^A, y_N^B, u_N). \quad (17)$$

Заметим, что простейшая постановка задачи класса А использует принципы 1 и 2 из второго блока методологии и условие «критической» устойчивости, рассмотренное выше.

Блок V. Моделирование природо-промышленных систем.

Моделирование ППС связано с применением комплексного научного подхода к исследованию сложных био-, физико-химических процессов, происходящих в S_I и S_N . В нем, кроме необходимых профильных знаний по биологии, физике, гидродинамике и другим дисциплинам, требуются и междисциплинарные – в области математики, термодинамики, системотехники, кибернетики, биогеохимии, менеджмента и т.п., позволяющие связать в единое целое специфичные методы исследования промышленных и экологических подсистем, имеющих различные уровни организации и фазы своего существования.

В качестве такого научного подхода может быть эффективно использован известный «реакторный» подход к моделированию объектов химической и биохимической технологии, по причине хорошо разработанной его теоретической базы и методов практического применения. По свидетельству О. Левеншпиля [15], теория химических реакторов находилась у истоков развития современной биохимии и промышленной экологии. На сходство методов исследования химических и биологических процессов обращал внимание Р. Арис [16]. «Реакторную» трактовку моделирования озер впервые успешно использовали К. Чен и Д. Орлоб [17]. В работах российского академика В. В. Кафарова [18], теория химических реакторов стала не только «способом организации знаний о химических процессах, реакторах и аппаратуре», но и универсальной методологией познания техносферных процессов. В этой связи представляется целесообразным использование методов теории химических реакторов для моделирования объектов ППС. Для этого воспользуемся концепцией «экологического реактора». Понятие «экоректора» формализуем следующим образом. Будем считать, что биотоп как место-

обитание видов служит оболочкой реактора, населяющие его биоценозы являются веществами – «реагентами», а природные источники энергии – «приводом» биосинтеза. На основании этого дадим следующую формулировку.

Определение 6. «Экоректором» назовем термодинамически открытую, саморегулируемую систему, образованную из биотопа, биоценозов и природных источников энергии, предназначенную для синтеза биологических видов в количествах и соотношениях, определяемых сложившимися на длительном интервале времени условиями ее функционирования. Экоректор характеризуется конкретными пространственно-временными границами, конечным числом контактов с его окружением, известными механизмами взаимодействия живых организмов и химических веществ, а также известной гидродинамической структурой материально-энергетических потоков, существующих между интересующими точками его входов и выходов.

Методика моделирования S_{NIS} включает ряд операций: отображение системы в виде совокупности функциональных операторов F и Φ на основе топологического принципа формализации физико-химических и биологических систем; представления моделей процессов промышленной и природной технологии в блочно-модульном виде; синтеза модели всей системы из функционально самостоятельных блоков в соответствии со структурой связей, существующих между ними [19]. Примерный состав модулей, необходимых для разработки математического описания S_{NIS} , показан на рис. 5.

Выбор модулей в каждом конкретном случае зависит от постановки решаемых задач, типов моделируемых объектов и глубины понимания процессов, происходящих в системе.

Модульный принцип организации модели S_{NIS} имеет ряд преимуществ перед другими:

- способствует лучшему пониманию процесса моделирования всеми участниками междисциплинарных исследований;



Рис. 5. Набор основных модулей ППС

– разбиение системы на модули позволяет целенаправленно использовать накопленные данные о частично известных процессах;

– моделирование на принятом уровне детализации дает возможность эффективнее работать с важными, но плохо определенными величинами, используя для этого анализ чувствительности и методы математической статистики;

– модульный принцип облегчает разработку программы расчетов на компьютере.

Поскольку моделирование может оказаться затратным этапом методологии, целесообразно использовать систему автоматизированного моделирования ППС, относящуюся к категории экспертных систем.

Определение 7. Под автоматизированным моделированием будем понимать процесс синтеза и испытания математических моделей промышленных и экологических объектов (в выбранном классе моделей), реализуемый в режиме диалогового общения пользователя с системой автоматизированного моделирования, представляющей собой совокупность технических и программных средств, ориентированных на реализацию поставленной задачи.

Важнейшей особенностью этого процесса является его эволюционность, то есть по мере получения знаний о ППС осуществляется переход с абстрактного уровня описаний на системный, а затем и на конструктивный (рис. 6), где в качестве примера использована классификация моделей переноса примесей в атмосфере. Конструктивный уровень характеризуется выбором конкретного типа модели с известными параметрами.

Постановку задачи автоматизированного моделирования сформулируем следующим образом. Будем рассматривать θ классов математических моделей ППС: $M_1, \dots, M_i, \dots, M_\theta$, состоящих, в общем случае, из определенного числа конкретных реализаций конструктивных моделей $M_i = \{M_{i1}, M_{i2}, \dots\}$. Каждая такая модель обеспечивает определенное качество имитации био- и физико-химических процессов, характеризуемых целевой функцией $Q(M_{ij})$. В общем случае Q является вектором $Q = (q_1, q_2, \dots, q_k)$, где q_i – локальные критерии, $i = \overline{1, k}$. Наилучшей моделью назовем модель M_{ij}^* , для которой выполняется условие

$$Q(M_{ij}^*) = \operatorname{opt}_{n \in N} Q_n(M_{ij}), \quad (18)$$



Рис. 6. Три уровня описания модели ППС

где opt – оператор, определяющий принцип оптимальности в области Парето; N – множество индексов моделей из допустимого класса моделей.

Поскольку создание модели сопряжено с денежными затратами на разработку ее математического описания $D(M_{ij})$ и проведение имитационных экспериментов на компьютере $\Xi(M_{ij})$, общие затраты на исследование качества модели можно выразить формулой

$$S(M_{ij}) = D(M_{ij}) + \Xi(M_{ij}), \quad (19)$$

а время на разработку модели и проведение экспериментов обозначим $T(M_{ij})$.

Необходимо построить улучшающую последовательность моделей $M_{ij} = \{m_{ij}^1, \dots, m_{ij}^{l-1}, \dots, m_{ij}^l, \dots, m_{ij}^r\}$, для которой в смысле установленного отношения порядка:

$$\begin{aligned} Q(m_{ij}^l) &> Q(m_{ij}^{l-1}); \\ T(m_{ij}^l) &< T_3 - \sum_{v=1}^{l-1} T(m_{ij}^v); \\ S(m_{ij}^l) &< S_3 - \sum_{v=1}^{l-1} S(m_{ij}^v), \end{aligned} \quad (20)$$

где S_3, T_3 – соответственно допустимые денежные и временные затраты на создание и испытание моделей; $m_{ij}^1 = M_{ij}^k$ – первичный вариант модели из допустимого класса моделей.

Блок VI. Имитационное исследование моделей объектов и систем управления.

Содержание данного блока связано с проверкой адекватности выходных характеристик моделей природной и промышленной подсистем реальным данным и оценкой результатов искомых решений задач устойчивого развития из блока III. Цели имитационного исследования могут быть разными, но чаще всего связаны с получением информации следующего характера:

- 1) определения неизвестных значений параметров (констант) моделей;
- 2) оценки чувствительности моделей к начальным условиям, параметрам и управляющим переменным;
- 3) проверки структурной чувствительности моделей к различным вариантам «типовых» механизмов фотосинтеза, биохимической кинетики, поглощения и осаждения примесей, деструкции вредных веществ и другим, известным из литературы;
- 4) определения границ применимости моделей.

Для замкнутой системы управления ППС имитационное исследование связано с реализацией возможных сценариев развития экономики, определением таких характеристик, как эффективность, надежность, точность и ряда др. При этом в основу имитационного исследования положен метод статистических испытаний [20], известный как метод Монте-Карло, обладающий универсальными возможностями для решения указанных выше задач в системе автоматизированного моделирования.

Основываясь на принятых в блоке V концепциях, алгоритм автоматизированного моделирования ППС представим состоящим из следующих этапов: выбора перспективного класса моделей \tilde{M}_n ; выбора «кандидата» модели $M_{ij}^k \in \tilde{M}_n$ для испытания его качеств на компьютере; проведения имитационного исследования ППС на основе модели M_{ij}^k ; проверки принадлежности модели M_{ij}^k , улучшающей последовательности M_{ij} ; оценки возможности дальнейшего улучшения модели и перехода к новому этапу.

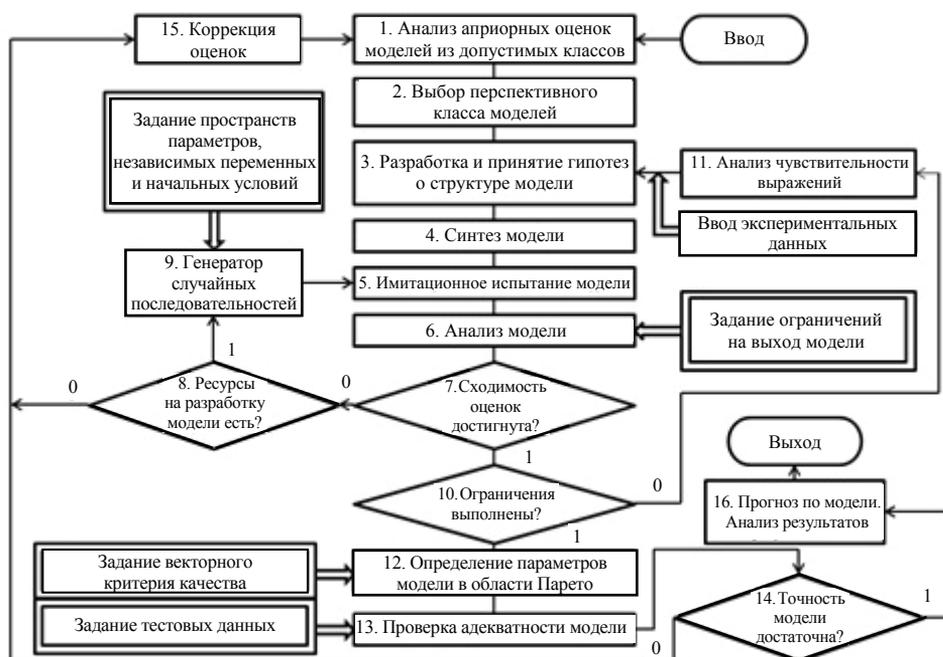


Рис. 7. Основные этапы автоматизированного моделирования

Более наглядно процесс имитационного исследования в системе автоматизированного моделирования показан на рис. 7.

Для процесса имитационного исследования характерны три фазы. Первая связана с разработкой структуры модели, адекватной на множестве «допустимых» для нее реакций (этапы 1 – 11). Вторая – с введением векторной целевой функции оценки качества модели и определением Парето-оптимальных значений ее параметров (этапы 12 – 15). Третья – с выполнением рабочих прогнозов по модели (этап 16).

Двойными линиями на рис. 7 обозначены информационные сигналы исследователя, а одинарными – вычислительные процессы. Работа на этапах 1, 3, 4 и 12 организована в интерактивном режиме. Разработка и принятие гипотез о структуре модели (этап 3) является существенно неформальной процедурой, требующей глубоких априорных знаний характеристик ППС и анализа экспериментальной информации. В противном случае процесс моделирования может рассматриваться как попытка «адаптации» выбранного «кандидата» модели к данной конкретной системе.

Блок VII. Диагностика устойчивости развития ППС.

Главной задачей при решении рассматриваемой проблемы является определение совокупности технологических, экономических и социальных инструментов, способных обеспечить долгосрочное устойчивое экономическое развитие ППС в процессе продвижения к поставленным целям. А поскольку это движение происходит при непосредственном участии системы управления (системы менеджмента), устойчивость надо понимать по отношению к работе замкнутой системы типа «объект – регулятор».

Известны два принципиально разных подхода к определению устойчивости процессов управления сложными системами: по «внешнему» и «внутреннему» описаниям [21]. В первом из них исследуемую систему надо представить в виде «черного» ящика, операторы которого при ограниченных входных воздействиях

продуцируют ограниченные по уровню выходные реакции, а во втором подходе система описывается дифференциальными уравнениями, исследование поведения которых проводится известными методами А. Ляпунова [22]. В данном случае рассмотрим только первый подход. Согласно одному из правил менеджмента устойчивого развития, эмиссии промышленных предприятий всегда должны быть меньше уровня ассимиляционной способности окружающей среды [13]. Из этого следует, что природа эффективно справляется только с небольшими объемами загрязнений, свыше которых возникают значительные экологические ущербы. Компенсировать эти ущербы должно предприятие в соответствии с принципом «загрязнитель платит».

Указанное обстоятельство можно использовать как эколого-экономический регулятор, встроенный в систему управления хозяйственной деятельностью ИПС. Работу регулятора представим в виде нелинейной функции (рис. 8), где f – предельное значение антропогенной нагрузки на экосистему, за которым наблюдается рост потерь в окружающей среде от исчезновения видов, деструкций, заболеваний и т.п. Интервал $[0, f]$ – зона «нечувствительности» регулятора. Семейство кривых отождествим с нелинейным звеном типа «клапан», известным в теории автоматического управления (см. рис. 8).

С учетом этого систему управления ИПС представим в виде встречно-параллельного соединения двух операторов: L – линейного, описывающего работу подсистемы S_I , и N – нелинейного звена (регулятора) в обратной связи, описывающего реакцию подсистемы S_N на антропогенные воздействия. Векторные переменные x_I, x_N соответствуют обозначениям на рис. 4, б; u_1 и u_2 – переменные, характеризующие отклонения в работе системы управления:

$$u_1 = x_I - N_1 u_2; \quad (21)$$

$$u_2 = x_N - L u_1. \quad (22)$$

Для системы, представленной на рис. 9, воспользуемся понятием абсолютной устойчивости, характеризующим движение системы при любых начальных возмущениях и любой нелинейности, подчиняющейся определенным условиям. Если $x(t)$ – вектор состояния рассматриваемой системы, записанный в отклонениях от невозмущенного состояния, тогда для абсолютной устойчивости требуется, чтобы норма $\|x(t)\| \rightarrow 0$, при $t \rightarrow \infty$ и любых начальных состояниях.

Целью исследования (21), (22) в аспекте устойчивости по «внешнему» описанию является определение условий, которые необходимо наложить на операторы L и N с тем, чтобы гарантировать получение ограниченных выходов системы при ограниченных входах. В противном случае выходной сигнал может неограниченно возрастать. Такими условиями являются:

$$\mu_1 \leq \frac{u_1(t)}{u_2(t)} \leq \mu_2, \text{ при } u_2(t) \neq 0, \quad (23)$$

$$u_1(t) = 0, \text{ при } u_2(t) = 0, \quad (24)$$

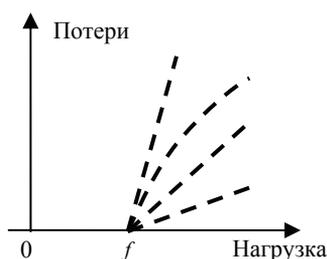


Рис. 8. Семейство кривых ущерба

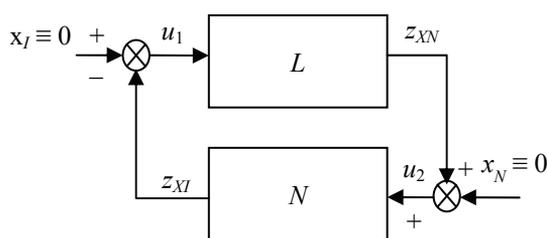


Рис. 9. Структура системы управления

из которых следует, что точка $[u_2(t), u_1(t)]$ должна всегда находиться в двухполосном секторе $M[\mu_1, \mu_2]$ между прямыми $u_1 = \mu_1 u_2$ и $u_1 = \mu_2 u_2$ на плоскости $\{u_1, u_2\}$, включая и эти прямые (рис. 10). Для природо-промышленной системы это крайне важно, так как вид нелинейности не всегда может быть хорошо известен, поэтому лучше заранее продумать «диапазон» ее возможных значений.

Заметим, что нелинейность может обладать характеристиками типа пассивного или активного гистерезиса и может быть нестационарной. Тогда как линейный оператор должен иметь устойчивый выходной сигнал с коэффициентом затухания α , то есть при $\alpha > 0$ выходная реакция на импульс или начальные условия должна стремиться к нулю быстрее, чем функция $\exp(-\alpha t)$. Данный метод управления позволяет также анализировать устойчивость функционирования ППС с распределенными переменными и запаздыванием.

Блок VIII. Прикладное исследование.

Теоретические положения описываемой методологии разрабатывались на протяжении многих лет, при этом ее отдельные этапы апробировались в процессе решения конкретных задач: проектирования и реализации биотехнологии утилизации меласной послеспиртовой барды [23 – 25], разработки систем автоматизированного мониторинга загрязнений в городском воздушном бассейне [28, 29], реконструкции городских очистных сооружений [30], моделирования процессов распространения примесей в реке с малым расходом воды [31] и некоторых других [26, 27]. В этом блоке примером прикладного исследования является проект реконструкции городских очистных сооружений, согласованный с программой долгосрочного социально-экономического развития г. Тамбова.

Целью проекта являлась разработка экологически безопасных и экономически эффективных вариантов модернизации технологической схемы и оборудования, эксплуатируемого с 1960-х годов. Проект ориентирован на перспективу в 20 и более лет, с учетом возможного изменения расходов сточной воды и содержания в ней азота и фосфора. Ограничением при его исполнении стало отсутствие свободной территории в случае необходимости расширения структуры технологического комплекса.

К основным задачам исследования отнесены:

- 1) анализ технико-экономических и экологических показателей работы существующих очистных сооружений;
- 2) поиск эффективных направлений модернизации технологий и оборудования;
- 3) обоснование проектных решений в фокусе устойчивого социально-экономического развития городских очистных сооружений и прилегающей к ним рекреационной зоны с садами, огородами, жилыми домами, рекой и т.п.

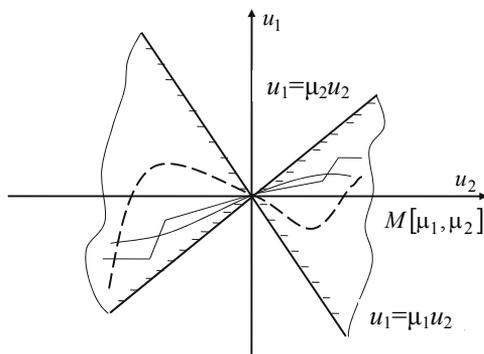


Рис. 10. Семейство нелинейностей в $M[\mu_1, \mu_2]$

Программа исследований в соответствии с методологией включает:

- изучение наилучших мировых практик по реконструкции очистных сооружений. Проведение совместного энергоаудита по разработанной методике [32] (см. рис. 1, блок I);
- профилирование научного подхода к решению задач проекта, используя принципы 1 – 6 из блока II;
- формализацию городских очистных сооружений как ППС [34], блок III;
- постановку задачи оптимального энергопотребления в подсистеме «аэротенк – отстойник» при условии выполнения экологических показателей очистки воды [34], блок IV;
- моделирование процесса очистки воды в подсистеме «аэротенк – отстойник» [33], блок V;
- разработку двухуровневой системы оптимального управления биологической очисткой в подсистеме «аэротенк – отстойник» с прогнозатором нагрузки на входе и адаптацией процесса очистки по кислороду [35]. Проведение имитационного исследования системы воздухораспределения в коридорах аэротенка, показавшего возможность экономии электропотребления турбовоздуходувкой до 15 %, блок VI;
- использование критерия абсолютной устойчивости в разработанной схеме управления гарантирует стабильность режимов работы оборудования [34], блок VII.

Структура разработанного программного комплекса в составе автоматизированной системы управления технологическими процессами городских очистных сооружений приведена на рис. 11. В процессе исследования также разработаны практические мероприятия по ликвидации илового осадка на территории очистных сооружений и устранению его запаха, что в значительной мере улучшает рекреационные качества прилегающих к сооружениям зон летнего отдыха граждан.



Рис. 11. Структура программного комплекса

Заключение

Мы живем в геологической эпохе, когда деятельность людей достигла невероятного масштаба. Основа такой деятельности – высокое потребление материальных и энергетических ресурсов, сопровождающееся рядом негативных явлений. Представленная в работе методология является одной из возможных попыток системной организации знаний о природе и обществе, нацеленной на поиск решений, способствующих устойчивому экономическому развитию. В технологическом аспекте устойчивое развитие возможно при использовании мало- и безотходных технологий, наилучших мировых практик, систем экологической безопасности, альтернативных источников энергии, организации «круговой» экономики и других решений, означающих новый этап в отношениях природы и общества. Дальнейшее углубление противоречий в отношениях природы и общества приведет к торжеству человеческого разума и обязательному использованию механизмов саморегулирования и самоорганизации.

Список литературы

1. Вернадский, В. И. Биосфера и ноосфера / В. И. Вернадский. – М. : Айрис-Пресс, 2004. – 576 с.
2. Вернадский, В. И. Несколько слов о ноосфере / В. И. Вернадский // Успехи современной биологии. – 1944. – № 18, вып. 2. – С. 113 – 120.
3. United Nations World Commission on Environment and Development. Our Common Future (The Brundtland Report). – Oxford : Oxford University Press, 1987.
4. Pezzey, J. Sustainability: An Interdisciplinary Guide / J. Pezzey // Environmental. – 1992. – Vol. 1, No. 4. – P. 321 – 362.
5. Bergh, Jeroen C.J.M. Van Den. Ecological Economics and Sustainable Development: Theory, Methods and Applications. – Edward Elgar Publishing, Inc., 1996. – 312 p.
6. Norgaard, R. B. The Case for Methodological Pluralism / R. B. Norgaard // Ecological Economics. – 1989. – Vol. 1. – P. 37 – 57.
7. Jones, T. E. Current Prospects of Sustainable Economic Growth. In: Coals in Global Community (The Original Background Papers for Goals of Mankind, A Report to the Club of Rome) / E. Laszlo and J. Bierman, eds. – New York, Oxford, Frankfurt, Pergamon Press, 1977. – P. 117 – 179.
8. Дейли, Г. На общее благо. Переориентация экономики к людям, окружающей среде и устойчивому будущему / Г. Дейли, Дж. Кобб ; пер. под ред. А. Ю. Ретеюма и П. И. Сафонова. – М. : Российское отделение ISEE, 1994. – 323 с.
9. Вернадский, В. И. Собрание сочинений: Т. 9. Химическое строение биосферы Земли и ее окружение. Биосфера и ноосфера / В. И. Вернадский ; науч. ред. и сост. Э. М. Галимов ; Ин-т геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского; Комиссия РАН по разработке научного наследия академика В. И. Вернадского. – М. : Наука, 2013. – 574 с.
10. Попов, Н. С. Вернадский, эволюция и устойчивое развитие / Н. С. Попов, О. В. Пещерова, А. А. Чуксина // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2017. – №4 (66). – С. 29 – 40.
11. Акофф, Р. О целеустремленных системах / Р. Акофф, Ф. Эмери. – М. : Сов. радио, 1974. – 272 с.
12. Повышение энергоэффективности природо-промышленных систем: учебное пособие / Н. С. Попов, В. Бьянко, И. О. Лысенко [и др.]; под общ. ред. Н. С. Попова. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2014. – 146 с.
13. Эндрес, А. Экономика природных ресурсов : учеб. пособие / А. Эндрес, И. Квернер. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2004. – 256 с.

14. Кафаров, В. В. Современное состояние кибернетики химико-технологических процессов и систем / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов // Проблемы автоматизированного проектирования и автоматизированного эксперимента : труды МХТИ им. Д. И. Менделеева. – М., 1983. – С. 5 – 23.
15. Levenspiel, O. The Coming-of-Age of Chemical Reaction Engineering / O. Levenspiel // Chem. Eng. Sci. – 1980. – Vol. 35. – P. 1821 – 1839.
16. Aris, R. Some Interactions between Problems in Chemical Engineering and Biological Sciences / R. Aris; eds. by G. Linder and K. Nyberg // Environmental Engineering. A Chemical Engineering Discipline. – Holland : D. Reidel Publ. Comp., 1973. – P. 215 – 225.
17. Chen, C. W. Ecological Simulation for Aquatic Environments / C. W. Chen, G. T. Orlob ; ed. by B. C. Patten // System Analysis and Simulation in Ecology. – New York : Acad. Press, 1975. – Vol. 3. – P. 475 – 588.
18. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов. – М. : Наука, 1976. – 500 с.
19. Моделирование технологических и природных систем : учеб. пособие / Е. В. Ермолаев [и др.] ; под общ. ред. Ю. Т. Панова и Н. С. Попова. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2014. – 154 с.
20. Hammersley, J. M. Monte Carlo Methods. – New York, 1964. – 123 p.
21. Касти, Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы : пер. с англ. / Дж. Касти. – М. : Мир, 1982. – 216 с.
22. Метод функций Ляпунова в динамике нелинейных систем / под. ред. В. М. Матростова, Р. И. Козлова. – Новосибирск : Наука, Сиб. отдел., 1983. – 188 с.
23. Арзамасцев, А. А. Кинетика роста микроорганизмов рода *Pseudomonas* на меласной послеспиртовой барде / А. А. Арзамасцев, В. И. Бодров, Н. С. Попов // Микробиология. – 1983. – Т. 52, № 6. – С. 929 – 934.
24. Арзамасцев, А. А. Моделирование процесса утилизации роста послеспиртовой барды / А. А. Арзамасцев, В. И. Бодров, Н. С. Попов // Известия вузов СССР. Химия и химическая технология. – 1983. – Т. 26, № 8. – С. 1002 – 1006.
25. Арзамасцев, А. А. Определение оптимальных условий культивирования микроорганизмов рода *Pseudomonas* на меласной послеспиртовой барде / А. А. Арзамасцев, В. И. Бодров, Н. С. Попов // Микробиологическая промышленность. – 1983. – № 6 (192). – С. 11 – 12.
26. Бодров, В. И. Методика выбора технологии химического процесса с учетом ее воздействия на окружающую среду / В. И. Бодров, Н. С. Попов, В. Л. Перов // Химическая технология. – 1982. – № 3. – С. 47 – 50.
27. Попов, Н. С. Экологически безопасное управление в природо-промышленных системах / Н. С. Попов // Прикладные проблемы управления макросистемами : тез. докл. III Всесоюзной школы. – М., 1989. – С. 189 – 192.
28. Бодров, В. И. Имитационная многоящичная модель загрязнения воздушного бассейна химических комбинатов / В. И. Бодров, Н. С. Попов // Проблемы контроля и защита атмосферы от загрязнения. – 1983. – Вып. 9. – С. 19 – 27.
29. Петрова, Н. П. К методике проектирования систем экологического мониторинга / Н. П. Петрова, Н. С. Попов, В. А. Лузгачев // Вестн. Тамб. гос. ун-та. – 2014. – Т. 19, № 5. – С. 1712 – 1716.
30. Прогнозирование режимов функционирования реконструируемых станций биологической очистки / И. В. Гордин [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 1988. – № 6. – С. 803 – 809.
31. Попов, Н. С. Методика автоматизированного моделирования процессов самоочищения реки с малым расходом воды в условиях неопределенности / Н. С. Попов, В. А. Немтинов, В. Г. Мокрозуб // Химическая промышленность. – 1992. – Т. 69, № 9. – С. 41 – 46.

32. Попов, Н. С. Научно-правовые основы проведения совместного энергоаудита / Н. С. Попов, Чан Минь Тьинь, Л. Н. Чуksина // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2014. – № 2 (51) – С. 34 – 42.

33. Моделирование оптимального распределения воздуха в коридорном аэротенке / Н. С. Попов [и др.] // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2016. – № 1 (59). – С. 19 – 28.

34. Попов, Н. С. О структуре системы управления процессом биологической очистки сточных вод / Н. С. Попов, О. В. Пещерова, Чан Минь Тьинь // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2015. – № 3 (57). – С. 34 – 45.

35. Попов, Н. С. Статистическое моделирование и прогнозирование изменений входной нагрузки на городских очистных сооружениях / Н. С. Попов, О. В. Пещерова, Чан Минь Тьинь // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2015. – № 4 (58). – С. 130 – 137.

Developing a System Approach to Deal with Regional Challenges for Sustainable Development

N. S. Popov¹, O. V. Peshcherova¹, L. N. Chuksina²

*Department of Nature Management and Environment Protection, TSTU (1);
Department of Foreign Philology and Applied Linguistics, G. R. Derzhavin TSU (2);
Tambov, Russia; eco@nnn.tstu.ru*

Keywords: development management tasks; methodology; modeling; nature-industrial systems; systems approach; sustainable development; V.I. Vernadsky's doctrine.

Abstract: The unprecedented growth of the world economy and the negative trends of its globalization have become the causes of the widespread destruction of the natural systems that are the basis of humanlife. The activities of UN and other leading international organizations have helped draw the attention of scientists to research and solve the emerging problem – the problem of sustainable development of civilization. The seriousness and complexity of this problem is beyond doubt.

This paper proposes a methodology for solving applied problems of sustainable development based on the ideas of a systems approach that allows the use of constructive engineering methods for greening the economy and society. One example of the application of the methodology is associated with the reconstruction of the city wastewater treatment plant.

References

1. Vernadskiy V.I. *Biosfera i noosfera* [Biosphere and Noosphere], Moscow: Ayris Press, 2004, 576 p. (In Russ.)

2. Vernadskiy V.I. [A Few Words About the Noosphere], *Uspekhi sovremennoy biologii* [Successes of Modern Biology], 1944, no. 18, issue 2, pp. 113-120. (In Russ.)

3. United Nations World Commission on Environment and Development. *Our Common Future* (The Brundtland Report), Oxford: Oxford University Press, 1987.

4. Pezzey J. Sustainability: An Interdisciplinary Guide, *Environmental*, 1992, vol. 1, no. 4, pp. 321-362.

5. Bergh Jeroen C.J.M. Van Den. *Ecological Economics and Sustainable Development: Theory, Methods and Applications*, Edward Elgar Publishing, Inc., 1996, 312 p.

6. Norgaard R.B. The Case for Methodical Pluralism, *Ecological Economics*, 1989, vol. 1, pp. 37-57.
7. Jones T.E. Current Prospects of Sustainable Economic Growth. In: *Coals in Global Community. (The Original Background Papers for Goals of Mankind, A Report to the Club of Rome)* E. Laszlo and J. Bierman, eds. New York, Oxford, Frankfurt, Pergamon Press, 1977, pp. 117-179.
8. Deyli G., Kobb Dzh. *Na obshcheye blago. Pereoriyentatsiya ekonomiki k lyudyam, okruzhayushchey srede i ustoychivomu budushchemu* [On the Common Good. The reorientation of the Economy Towards People, the Environment and a Sustainable Future], Moscow: Rossiyskoye otdeleniye ISEE, 1994, 323 p. (In Russ.)
9. Vernadskiy V.I. *Sobraniye sochineniy: tom 9. Khimicheskoye stroyeniye biosfery Zemli i yeye okruzeniye. Biosfera i noosfera* [Collected Works: Vol. 9. The Chemical Structure of the Earth's Bio-Sphere and its Environment. Biosphere and Noosphere], Moscow: Nauka, 2013, 574 p. (In Russ.)
10. Popov N.S., Peshcherova O.V., Chuksina A.A. [Vernadsky, Evolution and Sustainable Development], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2017, no. 4 (66), pp. 29-40. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Akoff R., Emeri F. *O tselestremlennykh sistemakh* [On Purposeful Systems], Moscow: Sovetskoye radio, 1974, 272 p. (In Russ.)
12. Popov N.S., B'yanko V., Lysenko I.O. [i dr.]. *Povysheniye energoeffektivnosti prirodno-promyshlennykh sistem* [Increasing the Energy Efficiency of Natural-Industrial Systems], Tambov: Izdatel'stvo Pershina R.V., 2014, 146 p. (In Russ.)
13. Endres A., Kverner I. *Ekonomika prirodnnykh resursov* [Economics of Natural Resources], St. Petersburg: Piter, 2004, 256 p. (In Russ.)
14. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. [The Current State of the Cybernetics of Chemical Engineering Processes and Systems], *Problemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya i avtomatizirovannogo eksperimenta: trudy MKHTI im. D. I. Mendeleeva* [Problems of Automated Design and Computer-Aided Experiment: Proceedings of the Moscow Institute of Chemical Technology. D.I. Mendeleev], 1983, pp. 5-23. (In Russ.)
15. Levenspiel O. The Coming-of-Age of Chemical Reaction Engineering, *Chem. Eng. Sci.*, 1980, vol. 35, pp. 1821-1839.
16. Aris R., Linder G. and Nyberg K. [Eds.]. Some Interactions between Problems in Chemical Engineering and biological Sciences, *Environmental Engineering. A Chemical Engineering Discipline.* – Holland: D. Reidel Publ. Comp., 1973, pp. 215-225.
17. Chen C.W., Orlob G.T., Patten B.C. [Ed.]. *Ecological Simulation for Aquatic Environments, System Analysis and Simulation in Ecology*, New York: Acad. Press, 1975, vol. 3, pp. 475-588.
18. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Osnovy strategii* [System Analysis of Chemical Technology Processes. Basics of Strategy], Moscow: Nauka, 1976, 500 p. (In Russ.)
19. Yermolayev V. [et al.]. *Modelirovaniye tekhnologicheskikh i prirodnnykh sistem* [Modeling of Technological and Natural Systems], Tambov: Izdatel'stvo Pershina R. V., 2014, 154 p. (In Russ.)
20. Hammersley J.M. *Monte Carlo methods*, New York, 1964, 123 p.
21. Kasti Dzh. *Bol'shiye sistemy. Svyaznost', slozhnost' i katastrofy* [Large Systems. Connectivity, Complexity and Disaster], Moscow: Mir, 1982, 216 p. (In Russ.)
22. Matrosova V.M., Kozlova R.I. [Eds.]. *Metod funktsiy Lyapunova v dinamike nelineynykh sistem* [The Method of Lyapunov Functions in the Dynamics of Nonlinear Systems], Novosibirsk: Nauka, Sib. otdel., 1983, 188 p. (In Russ.)

23. Arzamastsev A.A., Bodrov V.I., Popov N.S. [The Kinetics of the Growth of Microorganisms of the Genus *Pseudomonas* on the Molasses Distillery Bard], *Mikrobiologiya* [Microbiology], 1983, vol. 52, no. 6, pp. 929-934. (In Russ.)
24. Arzamastsev A.A., Bodrov V.I., Popov N.S. [Modeling of the Process of Utilization of the Post-Alcohol Bards], *Izvestiya vuzov SSSR. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Izvestiya Vuzov SSSR. Chemistry and Chemical Technology], 1983, vol. 26, no. 8, pp. 1002-1006. (In Russ.)
25. Arzamastsev A.A., Bodrov V.I., Popov N.S. [Determination of the Optimal Conditions for the Cultivation of Microorganisms of the Genus *Pseudomonas* on a Molasses Distillery Bard], *Mikrobiologicheskaya promyshlennost'* [Microbiological Industry], 1983, no. 6 (192), pp. 11-12. (In Russ.)
26. Bodrov V.I., Popov N.S., Perov V.L. [Methods of Choosing a Technology of a Chemical Process Taking into Account its Environmental Impact], *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical Technology], 1982, no. 3, pp. 47-50. (In Russ.)
27. Popov N.S. [Environmentally Safe Management in Natural-Industrial Systems], *Prikladnyye problemy upravleniya makrosistemami: tezisy dokladov III Vsesoyuznoy shkoly* [Applied Problems of Macrosystem Management: Abstracts of the Third All-Union School], Moscow, 1989, pp. 189-192. (In Russ.)
28. Bodrov V.I., Popov N.S. [Imitating Multi-Box Model of Air Pollution of Chemical Plants], *Problemy kontrolya i zashchita atmosfery ot zagryazneniya* [Problems of Control and Protection of the Atmosphere from Pollution], 1983, issue 9, pp. 19-27. (In Russ.)
29. Petrova N.P., Popov N.S., Luzgachev V.A. [To the Methodology for the Design of Environmental Monitoring Systems], *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tambov State University], 2014, vol. 19, no. 5, pp. 1712-1716. (In Russ., abstract in Eng.)
30. Gordin I.V., Popov N.S., Nemtinov V.A. [et al.]. [Prediction of Operating Modes of Reconstructed Biological Treatment Stations], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 1988, no. 6, pp. 803-809. (In Russ.)
31. Popov N.S., Nemtinov V.A., Mokrozub V.G. [Methodology for Automated Modeling of the River Self-Purification Processes with Low Water Flow under Conditions of Uncertainty], *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 1992, vol. 69, no. 9, pp. 41-46. (In Russ.)
32. Popov N.S., T'in' Chan Min', Chuksina L.N. [Scientific and Legal Foundations of a Joint Energy-Eco-Audit], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. 2 (51), pp. 34-42. (In Russ., abstract in Eng.)
33. Popov N.S., Luzgachev V.A., Peshcherova O.V., T'in' Chan Min' [Simulation of Optimal Air Distribution in the Corridor Aerotank], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2016, no. 1 (59), pp. 19-28. (In Russ., abstract in Eng.)
34. Popov N.S., Peshcherova O.V., T'in' Chan Min' [On the Structure of the Management System of the Process of Biological Wastewater Treatment], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2015, no. 3 (57), pp. 34-45. (In Russ., abstract in Eng.)
35. Popov N.S., Peshcherova O.V., T'in' Chan Min' [Statistical Modeling and Forecasting of Changes in Input Load on Urban Wastewater Treatment Plants], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2015, no. 4 (58), pp. 130-137. (In Russ., abstract in Eng.)

Entwicklung eines Systemansatzes für die Lösung der regionalen Herausforderungen für nachhaltige Entwicklung

Zusammenfassung: das beispiellose Wachstum der Weltwirtschaft und die negativen Auswirkungen ihrer Globalisierung sind zu den Ursachen für die weit verbreitete Zerstörung der natürlichen Systeme geworden, die die Grundlage des Lebens für die gesamte Menschheit bilden. Die fruchtbaren Aktivitäten der Vereinten Nationen und anderer führender internationaler Organisationen haben dazu beigetragen, die Aufmerksamkeit der Wissenschaftler auf die Erforschung und Lösung des entstehenden Problems zu lenken, dessen Ernsthaftigkeit und Komplexität außer Zweifel steht. Dieses Problem wird derzeit als Problem der nachhaltigen Entwicklung der Zivilisation bezeichnet.

Dieser Beitrag schlägt eine Methodologie zur Lösung der angewandten Probleme der nachhaltigen Entwicklung vor, basierend auf den Ideen eines Systemansatzes, der den Einsatz konstruktiver Methoden zur Ökologisierung von Wirtschaft und Gesellschaft ermöglicht. Eines der Beispiele für die Anwendung der Methodologie ist mit der Rekonstruktion der städtischen Abwasserkläranlage verbunden.

Mise au point d'une approche systémique pour relever les défis régionaux du développement durable

Résumé: La croissance sans précédente de l'économie mondiale et les tendances négatives de sa mondialisation ont contribué à la destruction généralisée des systèmes de la nature, qui constituent le fondement de la vie de l'humanité tout entière. L'activité fructueuse de l'ONU et d'autres grandes organisations internationales a contribué à attirer l'attention des scientifiques à la recherche et à la résolution du problème dont la gravité et la complexité ne font aucun doute. À l'heure actuelle, ce problème est considéré comme un problème de développement durable de la civilisation.

Ce travail propose une méthodologie pour les applications du développement durable, basée sur les idées d'une approche systémique permettant d'utiliser des techniques d'ingénierie constructives de l'écologie de l'économie et de la société. Un des exemples de l'application de la méthodologie est la reconstruction de la station urbaine de traitement des eaux usées.

Авторы: *Попов Николай Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», *Пещерова Ольга Викторовна* – ассистент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; *Чуксина Людмила Николаевна* – кандидат педагогических наук, доцент кафедры зарубежной филологии и прикладной лингвистики, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Шамкин Валерий Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.