

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ГИБРИДНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ТРУДНОФОРМАЛИЗУЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ

П.М. Клачек,¹ А.В. Бабкин,² И.В. Либерман¹

¹ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассматриваются проблемы, связанные с развитием современных компьютерных технологий принятия решений в цифровой экономике, а также методы, алгоритмы и программное обеспечение для решения задач управления и принятия решений в социально-экономических производственных системах. Предлагается перспективный подход, имеющий междисциплинарный характер, т. е. на границе следующих направлений: гибридных интеллектуальных систем, синергетического искусственного интеллекта, нейро- и психофизиологии, философии, кибернетики, экономико-математического моделирования и т. д. Рассмотрены основы структурной организации функциональных гибридных интеллектуальных систем принятия решений, предназначенных для решения трудноформализуемых производственно-экономических задач, а также предложен новый когнитивный подход в развитии интеграции и эффективного управления формализуемыми и слабоформализуемыми знаниями в системах принятия решений. Представлены теоретические и прикладные основы гибридного вычислительного (имитационного) моделирования на основе гибридного вычислительного интеллекта как перспективного междисциплинарного научного направления, позволяющего на основе гибких вычислений интегрировать и управлять точными, неточными и неопределенными знаниями в одной системе, обеспечивая на новом уровне моделирование сложных, в том числе нелинейных, процессов и явлений и синтез эффективных прикладных инструментариев. Введены понятия «неоднородная задача-система» и «интегрированный метод-система», на основе которых предложен принципиально новый подход в области моделирования сложных слабоформализуемых многокомпонентных экономических систем, функционирующих в условиях неопределенности, и соответствующих им трудноформализуемых производственно-экономических задач. На основе предложенного подхода впервые представлены методологические и технологические основы создания прикладных функциональных гибридных интеллектуальных систем принятия решений, которые, как показала практика, способны успешно справляться со сложностью трудноформализуемых производственно-экономических задач и вырабатывать качественно новые решения в различных предметных областях. Предлагаемые методы, технологии и прикладные инструментарии для создания функциональных гибридных интеллектуальных систем принятия решений в ряде трудноформализуемых производственно-экономических задач в различных предметных областях – нефтегазовой сфере, агропромышленной сфере, промышленном производстве, тяжелом машиностроении и т. д. в настоящее время, успешно применяются. Исследования в этой области активно продолжаются.

Ключевые слова: системы поддержки принятия решений, экономико-математическое моделирование, искусственный интеллект, цифровая экономика

Ссылка при цитировании: Клачек П.М., Бабкин А.В., Либерман И.В. Функциональная гибридная интеллектуальная система принятия решений для трудноформализуемых производственно-экономических задач в цифровой экономике // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2019. Т. 12, № 1. С. 21–32. DOI: 10.18721/JE.12102

FUNCTIONAL HYBRID INTELLIGENT DECISION-MAKING SYSTEM FOR HARD-TO-FORMALIZE PRODUCTIONAL AND ECONOMIC PROBLEMS

P.M. Klachek,¹ A.V. Babkin,² I.V. Liberman¹

¹ Baltic Federal University of Immanuel Kant, St. Petersburg, Russian Federation

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

The paper deals with the problems associated with the development of modern computer technologies for decision-making in the digital economy, as well as methods, algorithms and software for solving management problems and decision-making in socio-economic production systems. We propose a promising approach with an interdisciplinary character, spanning such areas as hybrid intelligent systems, synergistic artificial intelligence, neuro and psychophysiology, philosophy, cybernetics, economic and mathematical modeling, etc. The paper discusses the basics of structural organization of functional hybrid intelligent decision-making systems designed to solve productional and economic problems that are hard to formalize, and proposes a new cognitive approach to integration and effective management of formalized and poorly formalized knowledge in decision-making systems. Theoretical and applied fundamentals of hybrid computational (simulation) modeling based on hybrid computational intelligence are presented as a promising interdisciplinary scientific direction which allows, based on flexible calculations, to integrate and manage accurate, inaccurate and uncertain knowledge in one system, providing a new level of simulation of complex processes and phenomena (including nonlinear) and synthesis of effective application tools. Concepts of an inhomogeneous task-system and an integrated method-system are introduced, serving as a basis for a fundamentally new approach in the field of modeling complex poorly formalized multicomponent economic systems that operate under conditions of uncertainty and the corresponding hard-to-formalize productional and economic problems. The proposed approach was used to formulate for the first time the methodological and technological foundations for creating applied, functional hybrid intelligent decision-making systems, which, as practice has shown, can successfully cope with the complexity of hard-to-formalize productional and economic problems and develop qualitatively new solutions in different subject areas. At present, the proposed methods, technologies and applied tools to create functional hybrid intelligent decision-making systems in solving a number of hard-to-formalize productional and economic problems are successfully applied in different subject areas, such as oil and gas, agro-industrial or industrial production, heavy engineering, etc. Active research in this area continues.

Keywords: decision support systems, economic and mathematical modeling, artificial intelligence, digital economy

Citation: P.M. Klachek, A.V. Babkin, I.V. Liberman, Functional hybrid intelligent decision-making system for hard-to-formalize productional and economic problems, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 12 (1) (2019) 21–32. DOI: 10.18721/JE.12102

Введение. Основной тенденцией, связанной с развитием современных процессов, которые протекают в различных сферах человеческой деятельности, в настоящее время является усложнение задач, решаемых на разных уровнях управления. В первую очередь, это неразрывно связано с возрастающими объемами различных видов разнородной информации, которая необходима для

обоснованного принятия решений. Кроме того, важным фактором является необходимость сокращения времени, необходимого для принятия решений. В работах профессора Клейнера [1–3], посвященных системно-интеграционной теории предприятия, предлагается комплексный подход, позволяющий в рамках обеспечения комплексной стратегии управления экономическими системами



[3–8] добиться существенного повышения качества принимаемых решений на основе применения современных информационных технологий [4, 5]. Как показывает мировой опыт [9, 10], существенного повышения качества принимаемых решений при выполнении различных видов производственно-экономических задач, в том числе при обеспечении комплексных стратегий управления экономическими системами [3–8], можно добиться на основе применения интеллектуальных систем принятия решений и методов искусственного интеллекта [9, 10]. В [7, 9] на основе накопленного опыта применения интеллектуальных систем принятия решений в широком круге производственно-экономических задач [7, 9] дается обоснование зависимости качества вырабатываемых решений от того, насколько математические модели, используемые в процессе выработки решений, преобладают над эвристическими моделями [11]. В [8–10] множество производственно-экономических задач, решаемых на основе применения интеллектуальных систем принятия решений, делится на три класса: формализуемые [9], трудноформализуемые [12] и неформализуемые [9, 13]. В [9] на основе всестороннего анализа применения различных видов интеллектуальных систем принятия решений при выполнении различных классов прикладных производственно-экономических задач как в России, так и за рубежом, показано, что большинство производственно-экономических задач относится к трудноформализуемым [12, 14], обладающим следующими характеристиками: большим количеством факторов, связанных с поведением производственно-экономических систем, относительно которых принимаются решения; разнотипностью данных, в среде которых функционируют производственно-экономические системы; значительной априорной неопределенностью, не позволяющей использовать традиционные математические методы анализа информации на основе основополагающих системных закономерностей поведения производственно-экономических систем (адекватных этим системам в математическом и статистическом смысле) [1, 6, 9]. Таким образом, возникает задача сращивания (гибридизации) математических и эвристических

методов, а также современных информационных технологий. Как показано в [9], данная задача может быть успешно решена на основе применения функциональных гибридных интеллектуальных систем (ФГИС) [9–11], использующих при решении различных видов прикладных производственно-экономических задач более одного метода имитации интеллектуальной деятельности человека [9–11] и представляющих собой гибридную информационную систему, состоящую из аналитических моделей, экспертных систем, искусственных нейронных сетей, нечетких систем, генетических алгоритмов, имитационных статистических моделей [9].

Несмотря на достигнутые серьезные успехи в области применения гибридных интеллектуальных систем, особенно в слабоструктурированных предметных областях [17], эффективных прикладных систем для решения трудноформализованных производственно-экономических задач к настоящему времени не создано. Основная проблема в том, что при решении трудноформализуемых задач требуется интеграция двух и более функциональных компонент (методов моделирования) [18, 19], в связи с чем возникают серьезные проблемы (подробно представленные в [9]) в области интеграции и управления формализуемыми и слабоформализуемыми знаниями [20, 21], а также при создании прикладного программного обеспечения, что требует применения нестандартных подходов [9].

Таким образом, основной целью исследования является разработка эффективных методов и прикладных инструментариев повышения эффективности интеллектуальных систем обработки информации и управления, в частности компьютерных систем поддержки принятия решений при выполнении трудноформализуемых производственно-экономических задач на основе функциональных гибридных интеллектуальных систем принятия решений (ФГИСПР), которые, как показала практика [9], способны успешно справляться со сложностью трудноформализуемых производственно-экономических задач и вырабатывать качественные решения в различных предметных областях [9].

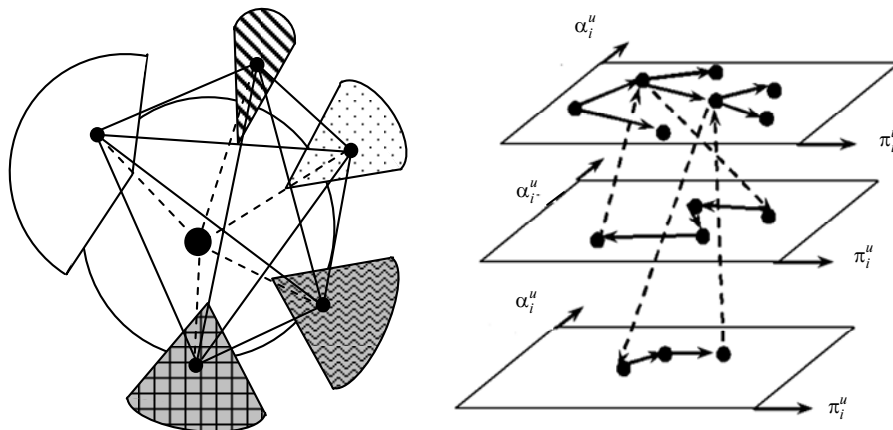


Рис. 1. Неоднородная задача-система
Fig. 1. Heterogeneous task-system

Методика исследования. Основными методологическими элементами ФГИСПР являются понятие «неоднородная задача-система», ее однородные подзадачи и интегрированный метод-система [9]. На рис. 1,а представлена неоднородная задача-система.

В [9] вводится понятие «неоднородная задача-система» и определяются основные закономерности, связывающие ее с однородными подзадачами, посредством отношений «целое/часть», обозначенных на рис. 1 пунктиром. Посредством данных отношений синтезируется состав задачи-системы, который изменяется в определенных пределах, не затрагивая качества системы. Посредством отношений «целое/часть» между однородными подзадачами ограничивается степень свободы между элементами, что приводит к невозможности решения одних однородных задач без решения других. Таким образом, задается порядок на причинно-следственной и временной шкалах при решении исходной неоднородной задачи-системы, приводящий к возможности получения системообразующего свойства системы, называемого эмерджентностью (возникновением, появлением нового) [9–11]. На его основе исходная задача-система будет иметь свойства, которые ни одна из ее составных частей не имеет в отдельности и которые не могут быть получены простым суммированием свойств однородных подзадач, входящих в ее состав. Для неоднородной задачи-системы, с изменчивостью ее состава и структуры, метод-система ее решения конструируется над некоторой взаимосвязанной совокупностью ниш

(автономных операторов [9, 10]) и приводит к созданию ФГИСПР как систем, имеющих архитектуру обмена информацией и функционирующих в неоднородном пространстве состояний, описываемых вектором $(m, x) \in M \times \mathfrak{R}^n$. Переход между дискретными состояниями m_i и m_j срабатывает, когда непрерывное состояние x достигает множества J_{ij} в R^n . Определим гибридную траекторию поведения системы на основе начального дискретного состояния гибридной системы – m_0 и соответствующего ему переходного множества $J_{m_0 m_1}(J_{01})$. При этом в случае, если $x \notin J_{m_0 m_1}$, то функционирование системы будет определяться вектором $f(m_0, \cdot)$ на основании $\dot{x}(t) = f(m_0, x(t))$. Таким образом, если поведение системы в момент времени t_1 , $x(t_1) \in J_{m_0 m_1}$ изменится на m_1 , то гибридная траектория поведения системы будет определяться на основе $\dot{x}(t) = f(m_0, x(t))$, с начальным условием $x(t_1) = x_1$ и выходным сигналом $O_1 = \omega(m_1)$. Назовем такое функционирование гибридным имитационным процессом [9].

На рис. 1 представлен пример организации гибридного имитационного процесса в ФГИСПР в полиморфическом режиме [9]. В данном режиме при моделировании задачи-системы автономные операторы функционируют одновременно, что приводит к появлению системообразующих отношений интеграции элементов задачи-системы, которые, как показано в [9], невозможно синтезировать в рамках одномодельного моделирования [9].

В [9, 10, 12] подробно рассмотрены основные особенности и формальные основы сложных слабоформализуемых многокомпонентных экономических систем (ССМС) и соответствующих им трудноформализуемых производственно-экономических задач [9]. Как показали исследования [9, 10], применение функциональных гибридных интеллектуальных систем, используемых при решении различных видов прикладных производственно-экономических задач, ставит задачу как разработки теоретических методов и инструментариев гибридного моделирования ССМС [9], так и создания прикладных гибридных интеллектуальных моделей (ГИМ) для различных типов прикладных производственно-экономических систем. В [9] приводятся основы создания гибридных интеллектуальных моделей ССМС, имеющих универсальный характер, способных функционировать в условиях реального времени и основанных на принципах гибридного имитационного процесса.

На рис. 2 приведена универсальная архитектурно-технологическая схема ГИМ ССМС.

В [9] приведена общая формальная схема ГИМ ССМС:

$$m_{ГВМ}^a |^{\Gamma^a} = \langle M^u, M^h, T_{Гс}, I^{bc} \rangle, \quad (1)$$

где $M^u = \{m_1^u, \dots, m_{N_u}^u\}$ – множество базовых модельных структур [9]; $M^h = \{m_1^h, \dots, m_{N_h}^h\}$ – множество дополняющих модельных структур ($\forall m_i^u \exists M^h = \{m_1^h, \dots, m_{N_h}^h\}, i=1, \dots, N_{\Gamma}, \forall i (N_h = \text{var } y), m_i^u \in M^u$) [9]; $T_{Гс}$ – таблица гибридных стратегий [1]; $I^{ГВИ}$ – интерпретатор, представляющий четверку процессов [9]:

$$I^{ГВИ} = \langle I^{\Gamma^1}, I^{\Gamma^2}, I^{\Gamma^3}, I^{\Gamma^4} \rangle,$$

где I^{Γ^1} – процесс исследования гибридной корреляции базовых и дополняющих модельных структур; I^{Γ^2} – процесс выбора в соответствии с $T_{Гс}$ метода гибридного вычислительного интеллекта (ГВИ [9]); I^{Γ^3} – процесс разработки в соответствии с методом ГВИ гибридной вычислительной модели; I^{Γ^4} – процесс выбора или разработки гибридной вычислительной схемы.

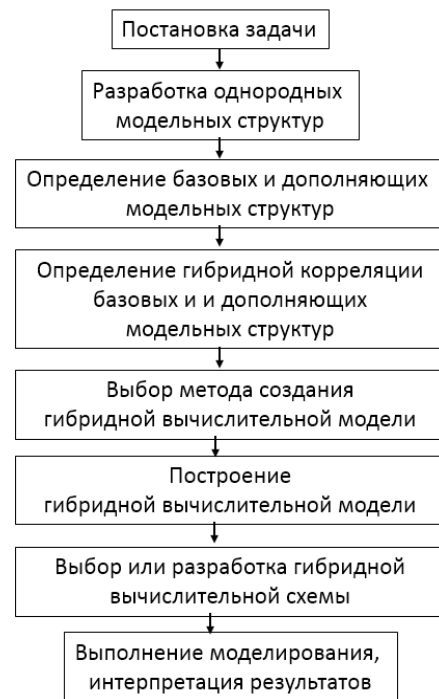


Рис. 2. Универсальная архитектурно-технологическая схема ГИМ ССМС

Fig. 2. Universal architectural and technological scheme of GIM SSMS

Модель (1) имеет универсальный характер и применима для различных видов моделирования. Более детально формальное представление данной модели для различных видов моделирования, в частности, для математического моделирования сложных технических и технологических систем, графо-семантического моделирования социально-экономических систем, экономико-математического моделирования и т.д., представлено в [9].

На рис. 3 представлена модель ФГИСПР для ССМС, предполагающая реализацию на основе (1) модели коллективного процесса принятия решений для большого количества прикладных, производственно-экономических задач [9], присущего большому классу ССМС.

Данный подход позволяет осуществлять быстрый переход к автоматизированному процессу разработки ФГИСПР на основе много-агентных систем (MAS) [9]. На рис. 4 представлена архитектура ФГИСПР на основе MAS, подробно рассмотренная в [9].

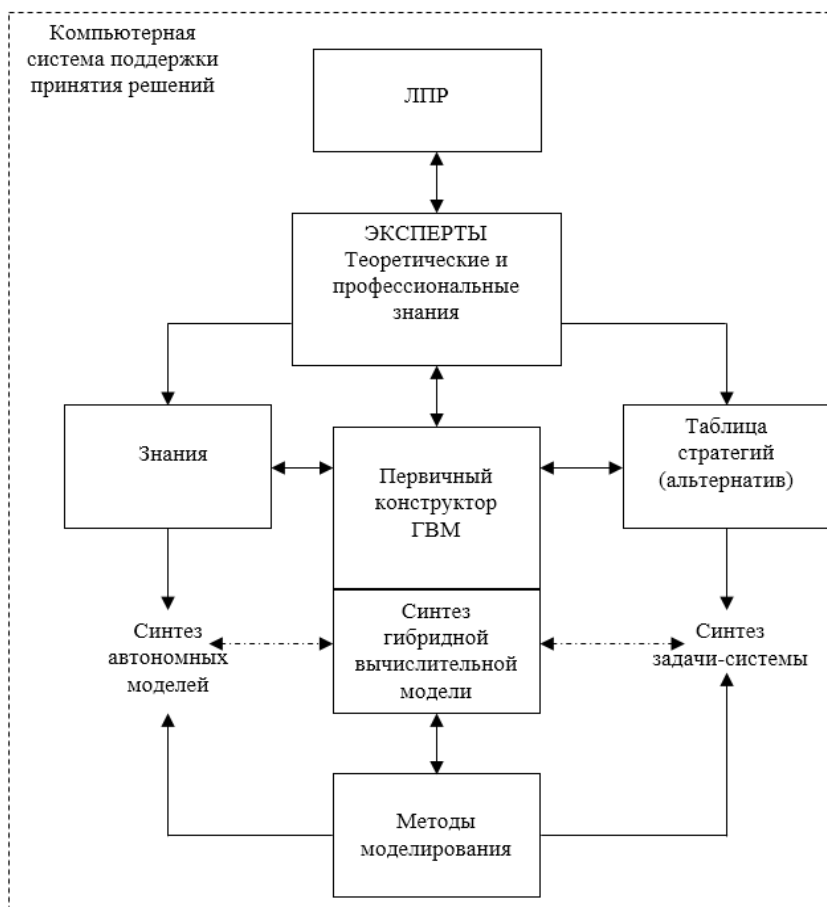


Рис. 3. Модель ФГИСПР ССМС

Fig. 3. Model FSISP SSMS

В [9] рассматривается несколько типов ФГИСПР, получаемых на основе реализации новых информационных моделей сочетанием технологически разнородных элементов. Первая схема создания ФГИСПР представляет собой следующую информационную конструкцию [9]:

(Гибридная интеллектуальная система) +
 + (База данных) + (Экспертная система),
 или (Экспертная система) + (База данных) +
 + (Гибридная интеллектуальная система),
 или (База данных) + (Экспертная система) +
 + (Гибридная интеллектуальная система) =>
 => ПРИКЛАДНАЯ ЗАДАЧА.

Данная схема подразумевает «системообразующее» объединение отдельных однородных подсистем для решения задачи. В рамках данной

схемы подсистемы выполняют узкоспециализированные функции, а взаимодействие между подсистемами осуществляется на основе обмена данными на основе общего доступа к информационным ресурсам.

Вторая схема представляет собой следующую информационную конструкцию [9]:

(Гибридная интеллектуальная система),
 (Экспертная система), (База данных) =>
 => ПРИКЛАДНАЯ ЗАДАЧА.

Данная схема определяет взаимодействие между подсистемами по событиям на основе сценариев [9]. Управление и обмен данными осуществляется управляющим ядром системы [9], инициирующим работу нужных подсистем, в рамках соответствующего сценария

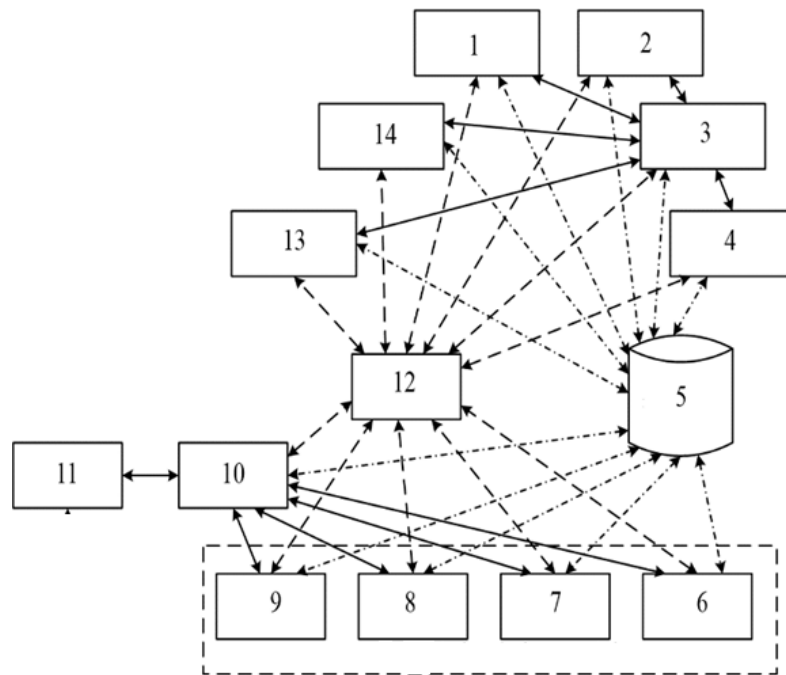


Рис. 4. Архитектура ФГИСПР на основе MAS систем

1 – логический модуль; 2 – нечеткий модуль; 3 – модуль-преобразователь;
 4 – лингвистический модуль; 5 – модуль предметной области; 6–9 – модули поиска решения;
 10 – модуль принятия решения; 11 – интерфейсный модуль; 12 – модуль обмена информацией;
 13 – аналитический модуль; 14 – стохастический модуль

Fig. 4. Architecture of Federal State Unitary Prospecting and Information Technology based on MAS systems

1 – logic module; 2 – fuzzy module; 3 – converter module; 4 – linguistic module; 5 – domain module;
 6–9 – solution search module, 10 – decision module; 11 – interface module;
 12 – module-information exchange; 13 – analytical module; 14 – stochastic module

Третья схема представляет собой следующую информационную, близкую к синергетической, конструкцию [9]:

ЯДРО ↔ (Экспертная система), ЯДРО ↔ (База данных),
 ЯДРО ↔ (Гибридная интеллектуальная система) =>
 => ПРИКЛАДНАЯ ЗАДАЧА.

В рамках данной схемы осуществляется синергетическое взаимодействие [9] между подсистемами, предполагающее доступ из одной подсистемы к функциям другой подсистемы.

Результаты исследования. Апробация предлагаемых решений проводилась на примере создания ФГИСПР управления технологическим процессом бурения нефти и газа [9]. В настоящее время технология термогравитационного дренирования пласта [9] является одним из перспективных направлений в области термического извлечения

тяжёлых нефтей и природных битумов в системах горизонтальных скважин. Выбор оптимальных параметров закачиваемого в пласт теплоносителя является важным фактором для реализации данной технологии. В [9] приводится зависимость радиуса зоны прогрева межскважинного пространства от времени закачки пара при различных значениях сухости, а также приводится зависимость теплосодержания пара от его сухости. С точки зрения повышения технологической эффективности разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти имеет значение выполнение условий, вытекающих из закономерности теплообмена пласта с окружающими породами [9], на основе которых осуществляются контроль производительности и качество генерируемого пара, что позволяет существенно расширить возможность оптимизации режимов эксплуатации технологическим процессом бурения нефти и газа.

Накопленный в Татарстане, Удмуртии, Республике Коми и других нефтедобывающих регионах Российской Федерации опыт разработки месторождений тяжёлых нефтей и природных битумов [9] позволяет определить целесообразность и экономическую эффективность разработки залежей тяжёлых нефтей и природных битумов в зависимости от геолого-физических условий их залегания, физико-химических характеристик, промысловых параметров, а также результатов их переработки.

Процесс термогравитационного дренирования пласта основан на применении метода «паровой камеры» [9]. Посредством данного метода осуществляется закачка образуемого пара в окончание верхней горизонтальной скважины с последующим отбором нефтесодержащей жидкости через нижнее горизонтальное окончание добывающей скважины. Таким образом, осуществляется стечение нефти к кровле пласта, при этом зона нефти постоянно увеличивается, расширяясь по горизонтали и сливаясь с прогретыми зонами, расположенными вокруг соседних скважин. В результате применения данного метода пар конденсируется при передаче тепла малоподвижной нефти на границе паровой камеры, а прогретая нефть вытесняется под действием собственного веса и сконденсировавшегося пара по направлению сверху вниз.

Для того чтобы уменьшить вязкость нефти и улучшить гидродинамическую связь между скважинами, проводят в течение нескольких месяцев предварительный прогрев межскважинного пространства путём циркуляции пара в обеих скважинах.

В соответствии с (1) на основе метода генезиса знаний [9] разработана гибридная вычислительная модель расчёта необходимого объёма пара при осуществлении прокачки на стадии предварительного прогрева, учитывающая геологические характеристики опытного участка [9]:

$$Q = \left(\frac{2\pi(T_3 - T_n)z\lambda_F}{(X_3 - X^*) \left(\ln \frac{\sqrt[2]{\lambda_F} t^*}{r_{скв}} \right)} \right)^{a_{nf}^3}, \quad (2)$$

где Q – расход пара в результате термогравитационного дренирования; π – константа; T_3 – температура пара на забое скважины; T_n – начальная температура пласта; z – длина про-

греваемого участка; λ_F – теплопроводность грунта; X_3 – сухость пара при забое; X^* – сухость пара, которую необходимо получить на устье; $\rho_{ск}$ – плотность скелета пласта; C_r – скрытая теплота парообразования; $C_{ск}$ – удельная теплоемкость скелета пласта; ρ_n – плотность пара; t^* – время циркуляции рабочего агента внутри трубопровода; $\alpha_{nf}^3 = \langle C_r, C_{ск}, \rho_n \rangle$, $Y(\Gamma, \text{mathematical degree})$, $KB, F^\mu, F^{TS}, F^y, I^f >$ – классическая нечеткая система [9, 10, 12].

На стадии предварительного прогрева, в том числе на этапе формирования паровой камеры, важное значение имеет расчет оптимальных параметров закачиваемого в пласт теплоносителя, так как водяной пар обладает большей энтальпией (теплосодержанием), по сравнению с горячей водой, что обеспечивает более высокое нефтеизвлечение. Изменение энтальпии насыщенного водяного пара зависит как от температуры и давления, так и от его сухости. Получение более высокого значения сухости пара при одинаковом давлении и температуре обеспечивает получение большего теплосодержания и, в итоге, более качественного пара, реализуя таким образом более оптимальный, с технологической точки зрения, прогрев межскважинного пространства методом термогравитационного дренирования.

В соответствии с (1) на основе метода генезиса знаний [9] разработана гибридная вычислительная модель расчёта радиуса прогрева межскважинного пространства в зависимости от периода прокачки при различных значениях сухости [9]:

$$r = \left(\sqrt{\frac{QC_{rX_3\rho_n t}}{\pi(C_r X_3 \rho_n + C_{ск} \rho_{ск} (T_3 - T_n))}} \right)^{a_{nf}^3}, \quad (3)$$

где r – радиус прогрева пласта; t – время прокачки пара; m – пористость пласта; h – расстояние между скважинами; β – коэффициент анизотропии пласта, $\alpha_{nr}^3 = \langle m, h, \beta \rangle$, $Y(\Gamma, \text{mathematical degree})$, $KB, F^\mu, F^{TS}, F^y, I^f >$ – классическая нечеткая система [9].

В настоящее время совместно с ведущими специалистами Гарвардской школы инженерных и прикладных наук ведется разработка инновационной ФГИСПР технологическим процессом бурения нефти и газа [1] (рис. 5, 6).

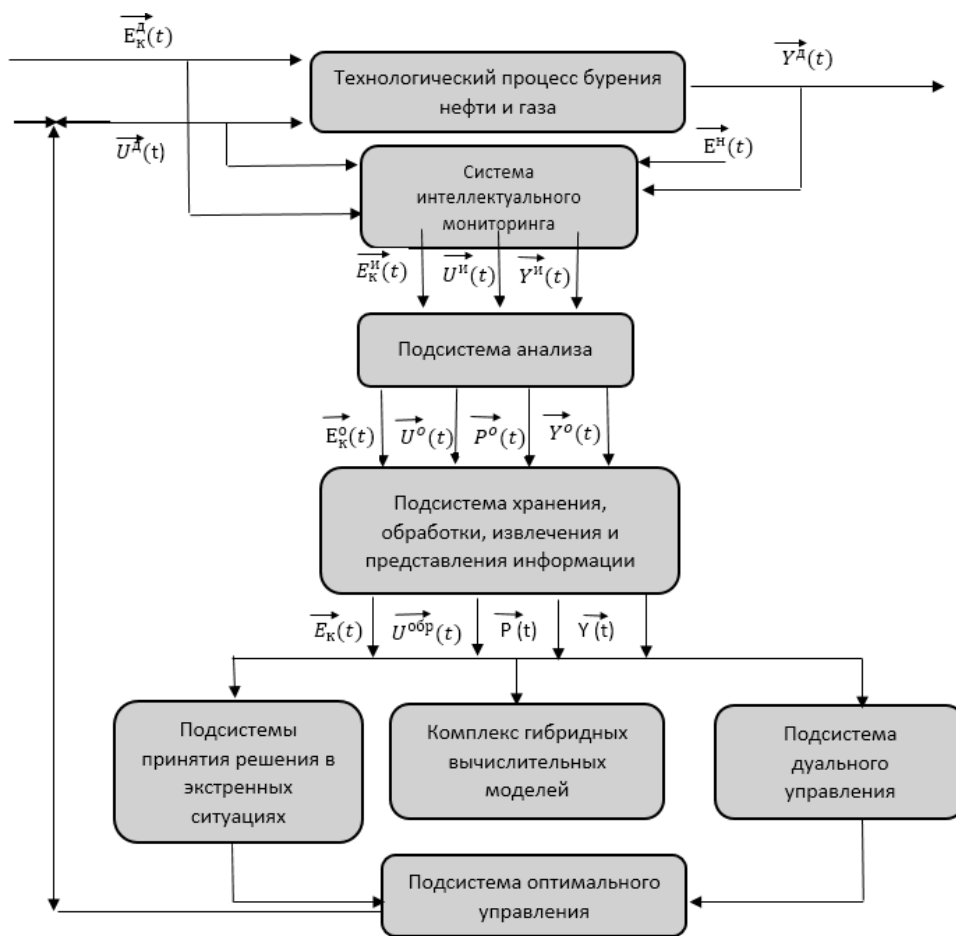


Рис. 5. Архитектура инновационной ФГИСПР технологическим процессом бурения нефти и газа [9]

Fig. 5. The architecture of innovative FGISPR process of drilling oil and gas [9]

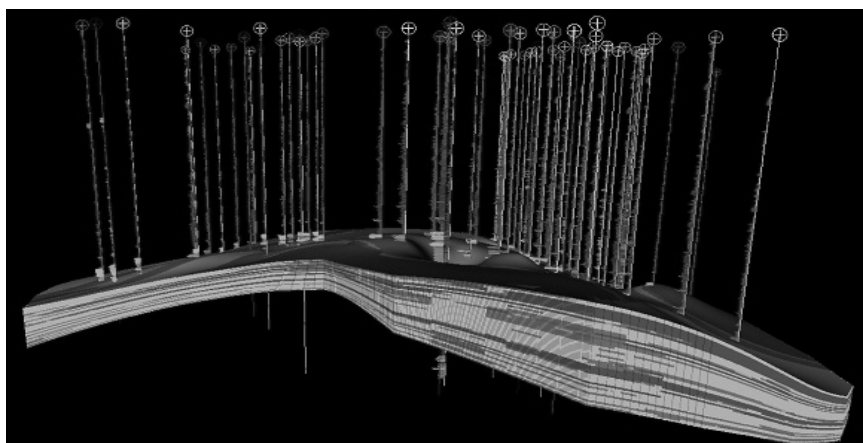


Рис. 6. Пример моделирования на основе (2), (3) оптимальных объемов и режимов закачки пара в скважины [9]

Fig. 6. An example of modeling, based on (2), (3), optimal volumes and modes of steam injection into wells [9]

Предварительные тестовые испытания прототипа ФГИСПР технологическим процессом бурения нефти и газа на нефтяном месторождении Алпайн (США, штат Аляска) показали потенциальную перспективность и широкие возможности предложенного подхода и разработанного прототипа ФГИСПР [9].

Таким образом:

- представлены теоретические основы гибридного вычислительного (имитационного) моделирования трудноформализуемых производственно-экономических задач на основе методов гибридного вычислительного интеллекта;
- введены понятия «неоднородная задача-система» и «интегрированный метод-система», на основе которых предлагается принципиально новый подход в области моделирования сложных слабоформализуемых многокомпонентных экономических систем, функционирующих в условиях неопределенности и соответствующих им трудноформализуемых производственно-экономических задач;
- впервые представлены методологические и технологические основы создания прикладных функциональных гибридных интеллектуальных систем принятия решений для выполнения трудноформализуемых производственно-экономических задач в различных предметных областях;
- представлены результаты успешного применения предлагаемых в работе методов, технологий и прикладных инструментариев для создания функциональных гибридных интеллектуальных систем принятия решений при выполнении ряда трудноформализуемых производственно-экономических задач в нефтегазовой сфере.

Выводы. Итак, впервые представлены методологические и прикладные основы создания функциональных гибридных интеллектуальных систем принятия решений, которые, как показала практика [9], способны успешно справляться со сложностью трудноформализуемых производственно-экономических задач, успешно осуществлять моделирование сложных слабоформализуемых многокомпонентных эконо-

мических систем и вырабатывать качественные решения в различных предметных областях [9]. Важной особенностью предлагаемого подхода является его междисциплинарность, которая на основе понятий «неоднородная задача-система» и «интегрированный метод-система» позволяет создать уникальную синергетическую платформу, т. е. на «границе» гибридных информационных систем, синергетического искусственного интеллекта, интеллектуальных систем управления, кибернетики и т. д., в свою очередь, создающую принципиально новый класс прикладных функциональных гибридных интеллектуальных систем принятия решения для выполнения сложных производственно-экономических задач в различных предметных областях.

На основе предложенного подхода впервые представлены методологические и технологические основы создания прикладных, функциональных гибридных интеллектуальных систем принятия решений, которые, как показала практика, способны успешно справляться со сложностью трудноформализуемых производственно-экономических задач и вырабатывать качественно новые решения в различных предметных областях. В настоящее время проведено успешное применение предлагаемых методов, технологий и прикладных инструментариев для создания функциональных гибридных интеллектуальных систем принятия решений при выполнении ряда трудноформализуемых производственно-экономических задач в различных предметных областях: нефтегазовой сфере, агропромышленной сфере, промышленном производстве, тяжелом машиностроении и т. д. Исследования в этой области активно продолжаются [9].

Накопленный к настоящему времени большой теоретический и практический опыт применения предлагаемых в работе методов, технологий и прикладных инструментариев для создания функциональных гибридных интеллектуальных систем принятия решений при выполнении ряда трудноформализуемых производственно-экономических задач в различных сферах – промышленном производстве, тяжелом машиностроении и т. д. позволил авторскому коллективу

ученых приступить к созданию авторской, не имеющей аналогов в мире технологии синтеза инновационных разработок, продукции и наукоемких услуг, получаемых на основе комплексирования различных методов и прикладных инструментариев и последующей генерации специализированных технологических цепочек нового

поколения, позволяющих аккумулировать передовые достижения в области науки, базовых и критических военных и промышленных технологий, обеспечивая генерацию новых знаний в меж-, мульти- и транс дисциплинарных областях для решения сложных задач промышленности, энергетики, транспорта, машиностроения и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Клейнер Г.Б.** Устойчивость российской экономики в зеркале системной экономической теории. Ч. 2 // Вопросы экономики. 2016. № 1. С. 117–138. WoS, Scopus.
- [2] **Клейнер Г.Б.** Устойчивость российской экономики в зеркале системной экономической теории. Ч. 1 // Вопросы экономики. 2015. № 12. С. 107–123. WoS, Scopus.
- [3] **Клейнер Г.Б.** Государство – регион – отрасль – предприятие: каркас системной устойчивости экономики России. Ч. 2. // Экономика региона. 2015. № 3. С. 9–17. Scopus.
- [4] **Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.** Технология поддержки агент-ориентированного моделирования для суперкомпьютеров // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2016. № 1 (334). С. 4–16.
- [5] **Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.** Агент-ориентированная социо-эколого-экономическая модель региона // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015. № 3 (288). С. 2–11.
- [6] **Макаров В.Л.** Эволюция экономической теории: воспроизводство, технологии, институты : матер. X Международ. симп. по эволюц. экон. и методолог. семинара по институц. и эволюц. экон. СПб.: Алетейя, 2015. 320 с. Разд. III «Экономические системы и социальное моделирование: Инструменты социального моделирования расширяют возможности научного анализа». С. 88–92.
- [7] **Макаров В.Л., Варшавский А.Е.** Наука, высокотехнологичные отрасли и инновации. Гл. 20: Экономика России // Оксфордский сб. Кн. 2. М.: Изд-во Института Гайдара, 2015.
- [8] **Makarov V., Bakhtizin A.** The New Form of Mixed Economy with Rationing: Agent-Based Approach // Open Journal of Social Sciences. 2014. No 2. P. 191–196. DOI: 10.4236/jss.2014.24019
- [9] **Клачек П.М., Полупан К.Л., Корягин С.И., Либерман И.В.** Гибридный вычислительный интеллект. Основы теории и технологий создания прикладных систем. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2018.
- [10] **Колесников А.В.** Гибридные интеллектуальные системы: Теория и технология разработки. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001.
- [11] **Гаврилов А.В.** Гибридные интеллектуальные системы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
- [12] **Ярушкина Н.Г.** Основы теории нечетких и гибридных систем. М.: Финансы и статистика, 2004.
- [13] **Колесников А.В., Кириков И.А.** Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. М.: ИПИ РАН, 2007.
- [14] **Батыршин И.З., Недосекин А.А., Стецко А.А., Тарасов В.Б., Язенин А.В., Ярушкина Н.Г.** Нечеткие гибридные системы: теория и практика. М.: Физматлит, 2007.
- [15] **Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В., Румовская С.Б., Доманицкий А.А.** Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. М.: ИПИ РАН, 2011.
- [16] **Medsker L.R.** Hybrid Intelligent Systems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [17] **Wermter S., Sun R.** Hybrid Neural Systems. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2000.
- [18] **Negnevitsky M.** Artificial Intelligence. A guide to intelligent systems. Harlow, England: Addison-Wesley, 2005.
- [19] **Castillo O., Mellin P.** Hybrid Intelligent Systems. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2006.
- [20] **Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.** Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000.
- [21] **Negnevitsky M.** Artificial Intelligence. A guide to intelligent systems. Harlow, England: Addison-Wesley, 2005.

КЛАЧЕК Павел Михайлович. E-mail: pklachek@mail.ru

БАБКИН Александр Васильевич. E-mail: al-vas@mail.ru

ЛИБЕРМАН Ирина Владимировна. E-mail: iliberman@kantiana.ru

Статья поступила в редакцию: 10.01.2019

REFERENCES

- [1] **G.B. Kleynner**, Ustoychivost rossiyskoy ekonomiki v zerkale sistemnoy ekonomicheskoy teorii. Chast 2, Voprosy ekonomiki, 1 (2016) 117–138. WoS, Scopus.
- [2] **G.B. Kleynner**, Ustoychivost rossiyskoy ekonomiki v zerkale sistemnoy ekonomicheskoy teorii. Chast 1, Voprosy ekonomiki, 12 (2015) 107–123. WoS, Scopus.
- [3] **G.B. Kleynner**, Gosudarstvo – region – otrasl – predpriyatiye: karkas sistemnoy ustoychivosti ekonomiki Rossii. Chast 2, Ekonomika regiona, 3 (2015) 9–17. Scopus.
- [4] **V.L. Makarov, A.R. Bakhtizin, Ye.D. Sushko**, Tekhnologiya podderzhki agent-orientirovannogo modelirovaniya dlya superkompyuterov, Natsionalnyye interesy: priority i bezopasnost, 1 (334) (2016) 4–16.
- [5] **V.L. Makarov, A.R. Bakhtizin, Ye.D. Sushko**, Agent-orientirovannaya sotsio-ekologo-ekonomicheskaya model regiona, Natsionalnyye interesy: priority i bezopasnost, 3 (288) (2015) 2–11.
- [6] **V.L. Makarov**, Evolyutsiya ekonomicheskoy teorii: vosпроизводство, tekhnologii, instituty. Materialy X Mezhdunarodnogo Simpoziuma po evolyutsionnoy ekonomike i Metodologicheskogo seminaru po institucionalnoy i evolyutsionnoy ekonomike. SPb.: Aleteyya, 2015. 320 s. Razdel III «Ekonomicheskiye sistemy i sotsialnoye modelirovaniye: Instrumenty sotsialnogo modelirovaniya rasshiryayut vozmozhnosti nauchnogo analiza», 88–92.
- [7] **V.L. Makarov, A.Ye. Varshavskiy**, Nauka, vysokotekhnologichnyye otrasli i innovatsii. Glava 20: Ekonomika Rossii, Oksfordskiy sbornik. Kniga 2. M.: Izd-vo Instituta Gaydara, 2015.
- [8] **V. Makarov, A. Bakhtizin**, The New Form of Mixed Economy with Rationing: Agent-Based Approach, Open Journal of Social Sciences, 2 (2014) 191–196. DOI: 10.4236/jss.2014.24019
- [9] **P.M. Klachek, K.L. Polupan, S.I. Koryagin, I.V. Liberman**, Gibridnyy vychislitelnyy intellekt. Osnovy teorii i tekhnologiy sozdaniya prikladnykh sistem. Kalinigrad: Izd-vo BFU im. I. Kanta, 2018.
- [10] **A.V. Kolesnikov**, Gibridnyye intellektualnyye sistemy: Teoriya i tekhnologiya razrabotki. SPb.: Izd-vo SPbGTU, 2001.
- [11] **A.V. Gavrilov**, Gibridnyye intellektualnyye sistemy. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2003.
- [12] **N.G. Yarushkina**, Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh sistem. M.: Finansy i statistika, 2004.
- [13] **A.V. Kolesnikov, I.A. Kirikov**, Metodologiya i tekhnologiya resheniya slozhnykh zadach metodami funktsionalnykh gibridnykh intellektualnykh sistem. M.: IPI RAN, 2007.
- [14] **I.Z. Batyrshin, A.A. Nedosekin, A.A. Stetsko, V.B. Tarasov, A.V. Yazenin, N.G. Yarushkina**, Nechetkiye gibridnyye sistemy: teoriya i praktika. M.: Fizmatlit, 2007.
- [15] **A.V. Kolesnikov, I.A. Kirikov, S.V. Listopad, S.B. Rumovskaya, A.A. Domanitskiy**, Resheniye slozhnykh zadach kommvoyazhera metodami funktsionalnykh gibridnykh intellektualnykh sistem. M.: IPI RAN, 2011.
- [16] **L.R. Medsker**, Hybrid Intelligent Systems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [17] **S. Wermter, R. Sun**, Hybrid Neural Systems. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2000.
- [18] **M. Negnevitsky**, Artificial Intelligence. A guide to intelligent systems. Harlow, England: Addison-Wesley, 2005.
- [19] **O. Castillo, P. Mellin**, Hybrid Intelligent Systems. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2006.
- [20] **T.A. Gavrilova, V.F. Khoroshevskiy**, Bazy znaniy intellektualnykh sistem. SPb.: Piter, 2000.
- [21] **M. Negnevitsky**, Artificial Intelligence. A guide to intelligent systems. Harlow, England: Addison-Wesley, 2005.

KLACHEK Pavel M. E-mail: pklachek@mail.ru

BABKIN Aleksandr V. E-mail: al-vas@mail.ru

LIBERMAN Irina V. E-mail: iliberman@kantiana.ru