

НАУЧНЫЕ МЕТОДЫ ИНЖИНИРИНГА ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕКТИВНЫХ ИНТЕНСИВНЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ**В.П. Мешалкин**

Валерий Павлович Мешалкин

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл. 9, Москва, Российская Федерация, 125047

Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский просп., 31, Москва, Российская Федерация, 119991

E-mail: vpmeshalkin@gmail.com

Кратко изложена история возникновения и сущность нового научного направления в химической технологии «Инжиниринг химико-технологических систем». Описаны виды инжиниринга на этапах жизненного цикла химико-технологических систем. Изложена общая характеристика принципов и методов интенсификации химико-технологических процессов и химико-технологических систем. Приведена краткая характеристика научно-обоснованных способов и приемов энергоресурсосбережения в химическом комплексе. Изложена краткая характеристика принципов автоматизированного синтеза оптимальных энергоресурсоэффективных экологически безопасных химико-технологических систем. Описано применение основных концепций логистики ресурсоэнергоэкономии в инжиниринге энергоресурсоэффективных экологически безопасных химико-технологических систем и цепей поставок. Кратко описаны методы эколого-экономической оптимизации химико-технологических систем, цепей поставок и систем газоснабжения химического и нефтегазохимического комплекса. Изложено применение методов оптимизации показателей надежности, цифровизированного управления рисками и безопасностью при инжиниринге энергоресурсоэффективных химико-технологических систем. Обоснована важность совершенствования многоуровневой подготовки кадров по направлению «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии». Подробно описаны приоритетные направления научных исследований по инжинирингу энергоресурсоэффективных химических технологий и химико-технологических систем, важнейшими из которых являются: методы интенсификации, комбинирования и миниатюризации химико-технологических процессов; методы цифровизированного инжиниринга и логистического управления эксплуатацией энергоресурсоэффективных экологически безопасных наукоемких химико-технологических систем и цепей поставок предприятий химического, нефтегазохимического, биохимического, фармацевтического и химико-металлургического комплекса; методы и способы рационального природопользования с широким применением возобновляемых природных ресурсов; методы комбинированной энергоресурсоэффективной экологически безопасной переработки промышленных и коммунальных бытовых отходов и стоков; методы цифровизированного инжиниринга безотходных природоподобных химико-технологических процессов и химико-технологических систем и инжиниринг «зелёных» цепей поставок в реальном секторе экономики и др.

Ключевые слова: автоматизированное управление, инжиниринг, интенсификация, искусственный интеллект, логистика, надежность, оптимизация, подготовка кадров, химико-технологическая система, химико-технологический процесс, цепь поставок, цифровизация, экологическая безопасность, энергоресурсосбережение, энергоресурсоэффективность

ENGINEERING SCIENTIFIC METHODS OF ENERGY AND RESOURCE EFFECTIVE INTENSIVE CHEMICAL PROCESS SYSTEMS IN DIGIT. ECONOMY CONDITIONS

V.P. Meshalkin

Valery P. Meshalkin

Russian University of Chemical Technology named after D.I. Mendeleev, Miusskaya sq., 9, Moscow, 125047, Russia

Institute of General and Inorganic Chemistry named after N.S. Kurnakov RAS, Leninsky ave., 31, Moscow, 119991, Russia

E-mail: vpmeshalkin@gmail.com

The history of the emergence and essence of a new scientific direction in chemical technology "Chemical Process Engineering" is briefly stated. The types of engineering at the stages of the life cycle of Chemical Process are described. A brief characteristic of scientifically grounded methods and techniques of energy and resource conservation in the Chemical Industry is given. A brief description of the principles of aided of optimal energy-resource-efficient environmentally friendly Chemical process is presented. The application of the basic concepts of of resource and energy saving logistics in the energy-efficient environmentally friendly Chemical process engineering and supply chains is described. Methods of ecological and economic optimization of Chemical Process, supply chains and gas supply systems of the chemical and petrochemical Industry are briefly described. The application of methods for optimizing reliability indicators, digitalized risk and safety management in the energy-resource-efficient Chemical Process engineering is described. The priority directions of scientific research on the of energy-resource-efficient chemical engineering and Chemical Process Engineering are described in detail, the most important of which are: methods of intensification, combination and minituarization of CTP; methods of digitalized engineering and logistics management of operation of energy-resource-efficient, environmentally safe, high-tech chemical-technological systems and CPUs of enterprises of chemical, petrochemical, biochemical, pharmaceutical and chemical-metallurgical complex; methods and methods of rational use of natural resources with a wide use of renewable natural resources, methods of combined energy-efficient and environmentally safe processing of industrial and municipal household waste and wastewater; methods of digitalized engineering of non-waste natural-like CTP and CTS and engineering of "green" CPUs in the real sector of the economy, etc.

Key words: artificial intelligence, automated control, Chemical Process, chemical unit operation, digitalization, energy resource efficiency, energy saving, engineering, environmental safety, intensification, logistics, optimization, reliability, specialist training, supply chain

Для цитирования:

Мешалкин В.П. Научные методы инжиниринга энергоресурсоэффективных интенсивных химико-технологических систем в условия цифровой экономики. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 8. С. 6–23

For citation:

Meshalkin V.P. Engineering scientific methods of energy and resource effective intensive chemical process systems in digit. Economy conditions. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 8. P. 6–23

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных интеллектуальных факторов успешного выполнения социально-экономических и природоохранных целей устойчивого развития человечества, провозглашенных в 2000-ом году Генеральной Ассамблеей ООН, в условиях цифровой экономики являются научные принципы и методы инжиниринга энергоресурсоэффектив-

ных интенсивных экологически безопасных сложных химико-технологических систем (ХТС), которым соответствуют производства химического (ХК) и нефтегазохимического комплекса (НГХК) [1-3].

Интенсивные химико-технологические процессы (ХТП) и энергоресурсоэффективные экологически безопасные цифровизированные сложные ХТС в условиях цифровой экономики в соответ-

ствии с целями устойчивого развития успешно решают следующие важнейшие организационно-технологические и социально-экономические задачи в реальном секторе экономики: рациональное использование природных ресурсов; минимизация техногенных отходов, включая выбросы парниковых газов; охрану окружающей среды от загрязнений; сохранение биологического разнообразия природных систем, социально-культурная гармонизация общества; повышение экономической эффективности промышленных предприятий и цепей поставок (ЦП); улучшение качества и увеличение продолжительности жизни людей [3-5].

ВИДЫ ИНЖИНИРИНГА НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Инжиниринг – это комплексная техническая, расчетно-графическая, – организационно-техническая, технико-экономическая и консультативно-техническая деятельность, которая реализует выполнение следующих видов разнообразной научно-исследовательской, проектно-конструкторской, расчетно-аналитической, организационно-управленческой и технико-экономической работы на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) химико-технологических систем: предпроектные исследования, технико-экономическое обоснование; бизнес-планирование; управление проектированием; разработка проектов; строительство и пуск в эксплуатацию; управление эксплуатацией и техническим обслуживанием [2-5].

Для получения научно-обоснованных результатов инжиниринга оптимальных энергоресурсосберегающих высоконадежных ХТС и цепей поставок химического комплекса и НГХК необходимо широко использовать методы и алгоритмы теории анализа, оптимизации и синтеза ХТС; методы логистики ресурсоэнергосбережения и проектирования оптимальной организационно-функциональной структуры энергоресурсоэффективных ЦП; методы математического моделирования и теории искусственного интеллекта; инструменты цифровизации, разработанные в условиях 4-й промышленной революции («Индустрия 4.0») [6-7].

Учитывая современное определение логистики как вида организационно-технической и управленческой деятельности (в широком понимании), – это «подробное оптимальное планирование любой сложной операции», инжиниринг безусловно относится также и к выполнению разнообразной логистической деятельности и логистического управления ЦП не только материальных потоков разнообразной промышленной продукции,

товаров и услуг, но и интеллектуальных потоков различных знаний, навыков и умений, т.е. компетентностей, представляющих собой важнейшую интеллектуальную продукцию современной цифровой или электронной экономики (digital or electronic economy) и экономики знаний (knowledge economy) [6].

Объекты изучения новой области научных исследований по *инжинирингу ХТС* («*Chemical Process Engineering*»), основоположником которой является профессор Roger W.H. Sargent (Imperial College, London) – это химико-технологические системы («*Chemical Process*», «*Process System*», «*Process*», «*Chemical Processing System*», «*Processing System*»; по-немецки «*Verfahrenstechnische Systeme*»).

Необходимо подчеркнуть, что научное направление – *инжиниринг ХТС* использует результаты научных исследований по типовым процессам химической технологии и аппаратам (оборудованию) химических производств (английские понятия: «*unit operation*», «*unit equipment*»), которые являются объектом изучения научного направления – «*Chemical Engineering*» (немецкое название: «*Verfahrenstechnik*»).

В Советском Союзе в начале 1970-х г. в связи с решением актуальных задач оптимизации технологических режимов построенных в СССР крупнотоннажных агрегатов большой единичной мощности (аммиака, азотной кислоты, карбамида, первичной нефтепереработки, этилена и др.) начал активно развивать научные исследования инжиниринга ХТС академик АН СССР В.В. Кафаров – основоположник нового научного направления в СССР «кибернетика химико-технологических процессов», который поставил важную научную задачу перед аспирантом кафедры кибернетики ХТП Московского Химико-Технологического Института им. Д.И. Менделеева (с 1982 г. – Российского Химико-Технологического Университета) Мешалкиным В.П. – активное изучение и развитие методов инжиниринга ХТС. Определенный вклад в развитие методов анализа нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств с позиций теории инжиниринга ХТС внес академик АН Азербайджана Нагиев М.Ф.

В условиях цифровой экономики важнейшую роль играет компьютеризированный (автоматизированный), или цифровизированный, инжиниринг (Computer–Aided or Digital Engineering), – это мультидисциплинарные, многомасштабные (многоуровневые) и многоэтапные разработки и исследования различных проектов с широким примене-

нием ЭВМ, INTERNET и инструментов информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), включая инструментальные комплексы технических и программных средств автоматизированного проектирования изделий (Computer–Aided Design – CAD–технологий); инструментальные комплексы компьютеризированной интегрированной логистической поддержки (Computer–Aided Logistics Support – CALS–технологий).

В настоящее время оставшаяся неизменной аббревиатура CALS получила новую расшифровку – Continuous Acquisition (Information) and Life-cycle Support непрерывная интегрированная информационная поддержка – всего ЖЦ изделия, или непрерывное накопление информации и поддержка ЖЦ.

Для оптимального управления эксплуатацией энергоресурсоэффективных ХТС и ЦП предприятий ХК и НГХК осуществляется инжиниринг систем компьютеризированного логистического управления ресурсами предприятий (Enterprise Resource Planning – ERP–систем), систем управления ЦП (Supply Chain Management – SCM–систем), систем управления отношениями с потребителями (Customer Relation Management – CRM–систем), систем компьютеризированного управления ЖЦ продукции (Product Life–cycle Management – PLM–систем) и систем управления данными о продукции (Product Data Management – PDM–систем), а также систем управления производством (Manufacturing Execution System – MES).

На основных этапах жизненного цикла ХТС, ЦП и различных объектов практически реализуются следующие основные виды инжиниринга: предпроектные исследования, планирование бизнес–процессов, техническое проектирование, специальные послепроектные разработки [1, 3, 6].

Важным инструментом компьютеризированного инжиниринга на различных этапах жизненного цикла ХТС являются CALS–технологии, которые представляют собой мощный компьютерный инструмент современного системного подхода к организации инжиниринга при проектировании, строительстве, эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте оборудования, а также при поставках требуемому потребителю высокотехнологичной, или наукоемкой, продукции [1, 2, 6].

Развитие CALS–технологий позволяет создавать так называемые распределенные виртуальные производства изделий или цифровизированные (цифровые) производства (digitalization or digital production (manufacture)), в которых процесс разработки спецификаций и различных проектно-

конструкторских документов с полной информацией, необходимой для изготовления изделия на программно управляемом технологическом оборудовании, может быть распределен во времени и пространстве между многими организационно автономными инжиниринговыми коллективами.

Разработка крупного общего проекта, выполняемого различными коллективами с использованием CALS–технологий на основе принципа сквозного, или параллельного, проектирования, обеспечивает надежную передачу результатов одного этапа проектирования на следующий этап в едином информационном пространстве. При этом изменения, вносимые на любом этапе проектирования, одновременно отображаются во всех частях крупного проекта [6].

Принцип сквозного проектирования позволяет контролировать целостность проекта, отслеживать внесение различных изменений в проектную документацию и синхронизировать их в реальном режиме времени. CALS–технологии и принцип сквозного проектирования в настоящее время активно используются в инженерно–технологическом проектировании энергоресурсоэффективных производств и предприятий ХК и НГХК с широким применением методов и алгоритмов теории автоматизированного анализа, оптимизации и синтеза сложных ХТС, а также при организационно–функциональном проектировании и многопериодном планировании оптимальных энергоресурсоэффективных ЦП химического и нефтегазохимического комплекса, включая системы газоснабжения.

В условиях цифровой экономики, глобализации и перехода к устойчивому развитию можно выделить пять основных теоретико–экспериментальных направлений инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных ХТС:

1. Повышение производительности и селективности химических процессов за счет интенсификации технологических операций и системного многоуровневого подхода к управлению ХТС (например, нано- или микроструктура катализаторных материалов).

2. Инжиниринг новых миниатюрных комбинированных единиц оборудования (ЕО), основанный на научных принципах и новых методах интенсификаций ХТС на основе использования многофункциональных комбинированных реакторов и высокоэффективных катализаторов, комбинированных процессов хемо–ректификации, хемо–экстракции и т.п.

3. Инжиниринг ХТС с использованием методологии тройного инжиниринга (кратко – методология 3Р-3Е) «Processus Engineering (Инжиниринг молекул) – Process Engineering (инжиниринг ХТС) – Plant Engineering (Инжиниринг завода)» для получения необходимого конечного высококачественного продукта.

4. Применение методов многомасштабного компьютерного моделирования любых ХТП и явлений в реальных ситуациях от молекулярного, микро-, макроуровня до производственного масштаба.

5. Применение методов цифровизации ХТС и ЦП.

В настоящее время получены крупные научные результаты в области многомасштабного моделирования ХТП, концептуального инжиниринга энергоресурсоэффективных ХТС, логистического управления ХТП и ЦП, оптимизации ХТС [2-4].

Цифровизация – это современное направление принципиального повышения показателей ресурсоэнергоэффективности, экологической безопасности и надежности ХТС и ЦП с использованием инструментов «Индустрии 4.0» и социально-экономической и культурной стратегии «Общество 5.0». Компании принимают цифровизацию как важнейшее направление преобразования их бизнес-процессов и ХТП, а также стимулирования развития инноваций, реинжиниринга бизнес-процессов и ХТП [6].

Крупные химические компании (BAYER, BASF, Shell, Dupont, Сибур, ФосАгро) применяют все инструменты цифровизации с высокой скоростью. Важным направлением цифровизации ХК и НГХК являются автоматизация всех бизнес-процессов на предприятии с использованием платформ Robotic Process Automation (RPA) – Роботизированной Автоматизации Процессов, компьютеризированное управление ХТП и ХТС, цифровизированное логистическое управление ЦП.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИНЦИПОВ И МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Применение принципов и методов интенсификации отдельных химико-технологических процессов и ХТС в целом вносит существенный интеллектуальный вклад в обеспечение устойчивого развития химической промышленности и представляет важное научное направление в инжиниринге ХТС [6-10].

Основные результаты применения способов интенсификации ХТП и ХТС для обеспечения инновационного устойчивого развития химической промышленности [9-11]: повышение качества и эффективности использования сырья, снижение капитальных затрат, миниатюризация ЕО, снижение экологических и производственных рисков.

Интенсификация ХТС (Process Intensification – PI) позволяет успешно решать актуальные проблемы повышения экономической эффективности и экологической безопасности химической промышленности, что приводит к быстрому росту интереса к этой области научных исследований. Существуют различные подходы к синтезу высокоинтенсивных энергоресурсоэффективных ХТС, большинство из которых основаны на использовании методов теории синтеза и оптимизации ХТС [8, 11-12, 14].

С позиций методологии системного подхода в химической технологии и теории инжиниринга энергоресурсоэффективных ХТС предложены четыре основных принципа микроуровневой интенсификации ХТП [8-11]:

1. Принцип максимизации эффективности внутримолекулярных и межмолекулярных взаимодействий (пример: динамически изменяющиеся условия для достижения кинетических режимов с более высокой конверсией и селективностью).

2. Принцип обеспечения всем молекулам, участвующим в химической реакции, одинаковых условий по времени и маршрутам взаимодействия (пример: реакция в потоке идеального вытеснения с равномерным безградиентным нагревом).

3. Принцип оптимизации движущей силы (ДС) процесса и максимизации удельной площади межфазной поверхности на каждом уровне взаимодействия в одном аппарате (пример: увеличение площади поверхности массопередачи через микроканальные конструкции).

4. Принципы максимизации синергетического эффекта от взаимодействия отдельных элементарных явлений или процессов, создание комбинированных, или интегрированных, ХТП, осуществляемых в одном аппарате (пример: многофункциональные реакторы, хемодистилляция, мембранная абсорбция).

На молекулярном уровне для интенсификации ХТП можно использовать следующие способы изменения режимов проведения каталитических реакций: модификация маршрута синтеза, химической кинетики, топологической структуры носителей катализатора (формо-селективные структуры,

функционализация поверхности, оптимальное распределения радиусов пор и связности пор). Все эти способы интенсификации на микроуровне ХТС тесно связаны с катализом.

При химических реакциях одинаковые условия по взаимодействию молекул могут быть достигнуты, например, с применением статических смесителей, которые обеспечивают для массообмена почти идеальный поршневой поток с очень интенсивным перемешиванием и повышением специфической межфазной поверхности.

Структурированные упаковки в реакторах, такие как монолиты, сетки, пены и различные конструкции микросмесителей, могут улучшить процессы местного перемешивания.

Классификация методов интенсификации ХТП и ХТС на макроуровне (двух основных направлений интенсификации ХТП: 1. виды специального оборудования; 2. Физико-химические и технологические методы интенсификации ХТП) представлены на рис. 1.



Рис. 1. Классификация методов интенсификации ХТП по двум направлениям: – специальное оборудование; – физико-химические и технологические методы интенсификации ХТП

Fig. 1. Classification of CTP intensification methods in two directions: - special equipment – - physico-chemical and technological methods of CTP intensification

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАУЧНО-ОБОСНОВАННЫХ СПОСОБОВ И ПРИЕМОВ ЭНЕРГОРЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЯ В ХИМИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Энергоресурсосбережение – это совокупность разнообразной научно-исследовательской, образовательной, проектно-конструкторской, производственно-хозяйственной, организационно-экономической, управленческой и любой предпринимательской деятельности, выполняемой на основе наиболее полного использования интеллектуальных и информационных ресурсов общества, по обеспечению оптимальных удельных расходов всех видов природных и материальных ресурсов (минеральное и углеводородное сырье, топливно-энергетические ресурсы (ТЭР), вода, воздух), а

также трудовых ресурсов, которые необходимы для выпуска в требуемом месте в требуемое время требуемого вида требуемого качества и требуемого количества продукции с соблюдением условий национального и международного законодательства, а также условий охраны окружающей среды (ОС) от химических загрязнений, включая снижение выбросов парниковых газов.

Разработка научно обоснованных решений по инжинирингу энергоресурсосберегающих экологически безопасных ХТС методологически базируется на применении следующих основных физико-химических и технологических способов энергоресурсосбережения в химическом комплексе [3-6]: способа наилучшего использования ДС химико-технологических процессов; способа наиболее

лее полной переработки сырья; способа рационального использования ТЭР; способа наилучшего функционально-структурного использования аппаратов и машин; способа замкнутого водоснабжения; способа обеспечения и повышения надежности производства; способа рациональной пространственной компоновки производства; способа оптимизации технологических режимов ХТП и ХТС; способа оптимального иерархического цифровизированного управления ХТС, предприятиями и ЦП химического комплекса и НГХК.

Способ наилучшего использования ДС химико-технологических процессов – это основополагающий способ энергоресурсосбережения, принципиально позволяющий значительно повышать степень переработки материальных ресурсов, резко снижать потери сырья, ТЭР, а также суще-

ственно сокращать удельные затраты конструктивных материалов при производстве химической продукции. Все другие способы энергоресурсосбережения в химической индустрии, в частности, способы наиболее полной переработки сырья и рационального использования ТЭР, направлены на всестороннее обеспечение и реализацию этого способа [3-6].

Для практической реализации различных способов энергоресурсосбережения применяют разнообразные режимно-параметрические, технологические, аппаратурно-конструкционные и организационно-технические приемы и операции [3-6]. Классификация способов энергоресурсосбережения на различных иерархических уровнях предприятий от микроуровня (молекулярного) до мета- и мегауровня ХК и НГХК представлена на рис. 2.



Рис. 2. Классификация способов энергоресурсосбережения на различных иерархических уровнях предприятий химического и нефтехимического комплекса

Fig. 2. Classification of energy saving methods at various hierarchical levels of chemical and petrochemical complex enterprises

При разработке научно-обоснованных способов и приемов энергоресурсосбережения в ХТС, также методов интенсификации ХТП необходимо широко использовать принципы «зеленой» химии [3-6].

Одним из важных способов энергоресурсосбережения в ХТС является способ оптимизации технологических режимов ХТП и ХТС, которые реализуют иерархически распределенные АСУТП и АСУП химического комплекса и НГХК.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИНЦИПОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСООФФЕКТИВНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В настоящее время применяются следующие принципы автоматизированного синтеза оптимальных энергоресурсоэффективных экологически безопасных ХТС, разработанные в начале 1980-х г.: декомпозиционно-поисковый, эвристи-

чески-декомпозиционный, интегрально-гипотетический, эволюционный [3, 5].

Указанные принципы синтеза оптимальных энергоресурсоэффективных ХТС комплексно отражают эвристические, технологические и математические положения теории упорядоченного поиска оптимальных решений разнообразных исходных задач синтеза (ИЗС) энергоресурсоэффективных ХТС [3,4].

Постановка любой исходной задачи синтеза ХТС определяется множеством данных – $\{P\}$, отображающим желаемые цели, параметры и свойства функционирования синтезируемой ХТС, которыми являются надежность, энергоресурсоемкость, устойчивость, чувствительность, управляемость и др., а также некоторые физико-химические и технологические предпосылки, обеспечивающие возможность выполнения ХТС поставленной цели функционирования.

Для каждой ИЗС– P существует оптимальное смысловое инженерно-технологическое решение, где $P^* \in \{P\}$, где $\{P\}$ – множество всех решений в виде альтернативных вариантов структуры синтезируемой ХТС. Решение P^* представляет собой такую оптимальную структуру ХТС, для которой величина критерия эффективности функционирования – ψ экстремальна [5].

В качестве критерия эффективности – ψ , используют обобщенный экономический критерий в виде чистого приведенного дохода $D_{пр}$ – для неоднородных ХТС ($\psi_1^* = opt \psi_1 = max D_{пр}$) или в виде приведенных затрат – Π для однородных систем ($\psi_2^* = opt \psi_2 = min \Pi$).

Сущность декомпозиционно-поискового принципа состоит в том, что трудоемкость многомерного поиска $P^* \in \{P\}$ сокращают как за счет декомпозиции многомерной исходной задачи синтеза ХТС на совокупность более простых задач, так и за счет перебора только лишь перспективных или рациональных вариантов решения ИЗС [5].

Сущность эвристическо-декомпозиционного принципа синтеза ХТС состоит в том, что поиск оптимального решения ИЗС проводится путем упорядоченного перебора множества эвристических решений, которые получены в результате заданного числа попыток синтеза структуры системы. При одной попытке получают некоторое эвристическое решение ИЗС на основе элементарной декомпозиции исходной задачи. Любая элементарная задача синтеза образуется в соответствии с выбранным эвристическим правилом (или эвристикой), входящим в определенный набор эвристик.

Эвристика – это утверждение, являющееся результатом, обобщения существующих научных знаний в области теоретических основ химической технологии и кибернетики ХТП, либо неоднократно проверенное экспериментально установленное решение, либо некоторое интуитивное или эмпирическое предположение исследователя, которое может привести к рациональному решению задачи синтеза ХТС [5, 14]. Выбор эвристики осуществляется случайным образом по величине её весового коэффициента, значение которого изменяется в зависимости от результатов предыдущих попыток синтеза ХТС с использованием адаптивных алгоритмов обучения.

Рассмотренные декомпозиционные принципы обеспечивают методологию генерации оптимальных технологических энергоресурсоэффективных структур ХТС, которая осуществляется как в диалоговом, так и в автоматизированном режимах.

Интегрально-гипотетический принцип синтеза ХТС включает следующие этапы [5]:

1. Разработка и анализ альтернативных рациональных вариантов технологической структуры ХТС.

2. Создание гипотетической обобщенной технологической структуры (ГОТС) путем функционально-логического объединения всех альтернативных вариантов структуры данной ХТС. Каждая структурная взаимосвязь между n -м и m -м элементами в ГОТС отображается коэффициентом структурного разделения потоков – δ_{n-m} .

3. Компьютерный анализ ГОТС. Для проведения компьютерного анализа ГОТС необходимо иметь математические модели всех ХТП системы и рекомендуется применять быстродействующие методы расчета многоконтурных ХТС и комплексы программ моделирования ХТС (Aspen, HYSYS, PRO, CHEMCAD и др.).

4. Вычленение из ГОТС оптимальной структуры синтезируемой ХТС путем решения многомерной дискретно-непрерывной задачи нелинейного программирования.

Интегрально-гипотетический принцип рекомендуется применять для разработки методов решения задач синтеза неоднородных ХТС на заданном множестве альтернативных вариантов ХТП и структурных связей между ними.

Эволюционный принцип включает следующие итерационно повторяемые этапы [5]:

1. Анализ некоторого исходного варианта технологической структуры ХТС.

2. Определение наименее эффективного элемента в исходном варианте системы. Исключение этого элемента из системы.

3. Модификация выделенного элемента ХТС.

4. Ввод модифицированного элемента в исходный вариант системы и коррекция структуры технологических связей ХТС. Практическая реализация 2-4 этапов связана с необходимостью использования различных эвристик, а также многоуровневых методов оптимизации и методов теории чувствительности.

5. Анализ и оптимизация полученного варианта технологической схемы ХТС.

С применением указанных принципов синтеза оптимальных энергоресурсоэффективных ХТС разработаны и практически активно используются при инжиниринге методы синтеза оптимальных однородных ХТС, к которым относятся рекуперативные теплообменные системы (ТС) и системы ректификации многокомпонентных смесей [3, 5].

Для решения задач синтеза оптимальных энергоресурсоэффективных рекуперативных ТС, а также водопотребляющих (водных) ХТС широко применяется термодинамический метод пинч-анализа [5].

ПРИМЕНЕНИЕ ОСНОВНЫХ КОНЦЕПЦИЙ ЛОГИСТИКИ РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ИНЖИНИРИНГЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ЦЕПЕЙ ПОСТАВОК

Важнейшими направлениями научных исследований в области логистики ресурсоэнергосбережения являются создание и применение [3, 7]:

- методов организации и управления проектированием инновационной продукции с оптимальной удельной ресурсоэнергоемкостью;
- методов организации и управления разработкой энергоресурсосберегающих производственных технологий и ХТС для выпуска инновационной высококачественной продукции;
- организационно-управленческих методов, способов и средств снижения материало-, ресурсо- и энергоемкости продукции в промышленности и в сфере услуг во всех звеньях ЦП «добыча сырья – транспортировка – складирование – материально-техническое обеспечение – производство – распределение продукции»;
- методов разработки экономически эффективной организационно-функциональной структуры (ОФС) энергоресурсосберегающих экологически безопасных, или «зеленых», ЦП предприятий ХК и НГХК на основе глубокого изучения физико-химической сущности всех ХТП, и использования стратегий логистики и методов теории оптимизации;

- методов минимизации товарно-материальных запасов (ТМЗ) и методов разработки «бережливых», или «стройных», промышленных производств и ЦП;

- методов оптимального планирования и управления потребностями в материалах, сырье и ТЭР при производстве продукции;

- методов проектирования и управления оптимальными системами водопотребления на производстве, методов минимизации сточных вод и организации замкнутого водооборота на предприятиях;

- разработка методологии организации переработки и управления движением обратных потоков отходов (отходопотоков), образующихся во всех звеньях «прямой» ЦП, и разработка оптимальной ОФС «обратной» ЦП;

- методов оптимального управления технологическими, экологическими и предпринимательскими рисками при проектировании и эксплуатации ЦП высококачественной продукции;

- методов всеобщего управления качеством всех ХТП и бизнес-процессов, а также всех материалопотоков и отходопотоков во всех звеньях ЦП и всех видов продукции (изделий и услуг);

- методов интегрированного экономико-экологического управления предприятиями ЦП и методов компьютерной оценки воздействия на ОС как отдельных предприятий, так и цепей поставок в целом;

- методов стратегического и оперативно-тактического управления корпоративным сотрудничеством между всеми предприятиями, входящими в ЦП, на основе концепции «долевого разделения прибыли» (концепции «WIN-WIN» – «Моя прибыль – Твоя прибыль») для обеспечения устойчивого развития и конкурентоспособности ЦП в целом.

При решении научно-практических задач логистики ресурсоэнергосбережения необходимо широко использовать современные информационные «CALS»-технологии управления всеми этапами ЖЦ инновационных продуктов и технологических установок, а также для решения задач организации и управления действующими производствами инструментальные программные комплексы, реализующие методы анализа ХТС и применять стандарты планирования потребности в материалах (MRP), планирования производственных ресурсов (MRP-II), планирования ресурсов предприятий (ERP) и планирования потребностей распределения (DRP); для проектирования оптималь-

ных технологических схем ХТС – инструментальные программные комплексы «CALS»-технологий, «CASE»-технологий и «CAPE»-технологий [3, 7, 15, 16]:

На рис. 3 представлена блок-схема современной методологии проектирования организационно-функциональной структуры энергоресурсоэффективных экологически безопасных, или «зеленых», ЦП.

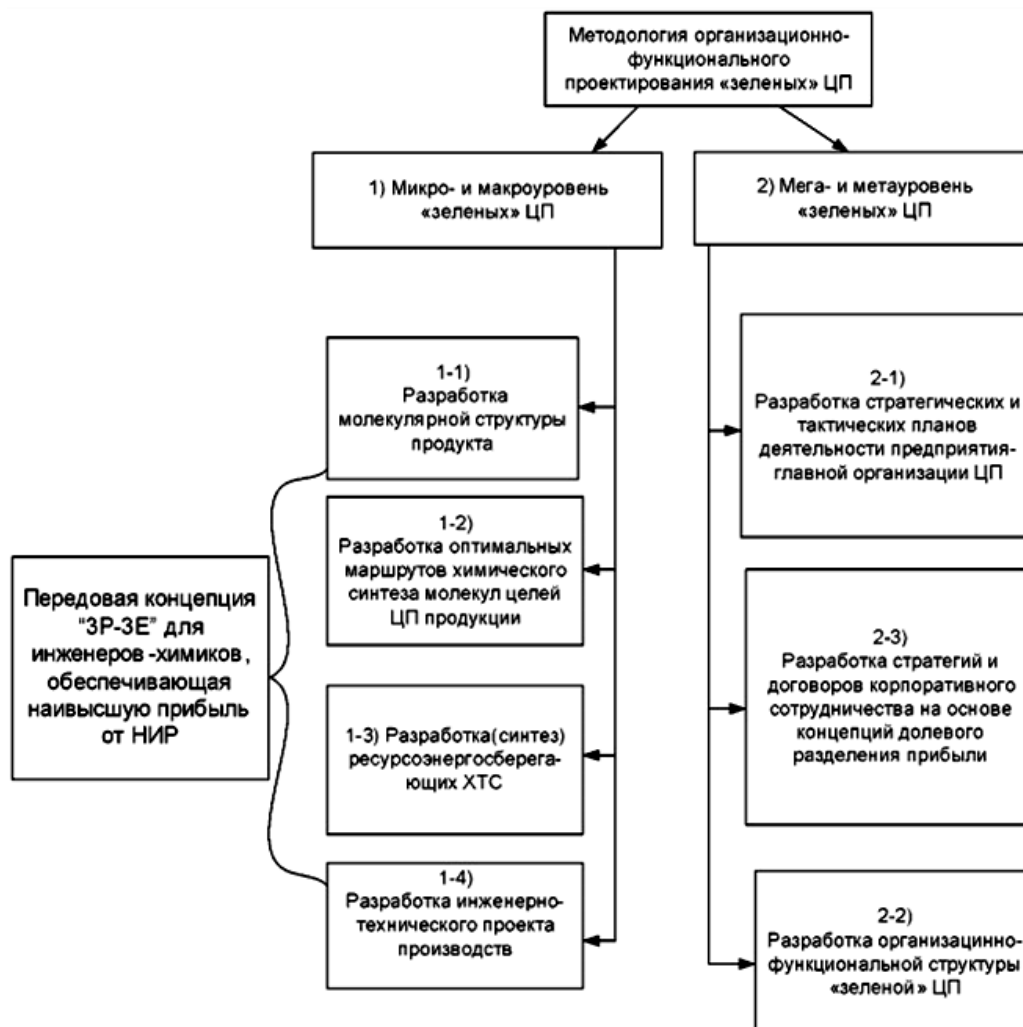


Рис. 3. Блок-схема двухуровневой методологии проектирования организационно-функциональной структуры «зеленых» цепей поставок

Fig. 3. Block diagram of a two-level methodology for designing the organizational and functional structure of "green" supply chains

При разработке рациональной ОФС «зеленых» цепей поставок предприятий ХК и НГХК и методологии ситуационного многопериодного управления эксплуатацией «зеленых» ЦП необходимо широко использовать не только принципы «зеленой» химии, но также международные стандарты серии ISO-9000, ISO-14000, ISO-19000 и OHSAS-18000, информационно-технические справочники по НДТ и, кроме того, учитывать мероприятия по реализации международной общественной программы «Ответственная забота» («Responsible Care»), а также «REACH»-законодательство.

МЕТОДЫ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ЦЕПЕЙ ПОСТАВОК И СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО И НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Проблема эколого-экономической и организационно-структурной оптимизации цепей поставок ХК и НГХК математически сформулирована в работе [13] как задача смешанного целочисленного линейного программирования (СЦЛП) с учетом режима многопериодного функционирования ЦП. Для решения задачи СЦЛП использован

комплекс программ Oracle SNO. В результате решения задачи обоснована экономическая целесообразность строительства в ЦП газового сырья нового завода по переработке широкой фракции легких углеводородов.

В последние годы появилось большое число научно-технических разработок по оптимизации сложных систем газоснабжения (ССГ) в НГХК, топливно-энергетическом комплексе, пищевой и фармацевтической промышленности с использованием различных математических моделей, учитывающих специфику и перспективы развития различных отраслей реального сектора экономики.

Необходимость решений проблемы охраны ОС и обеспечения экологической безопасности ХТС в последнее время вызвали бурный рост публикаций по «зеленым» цепям поставок ХК и НГХК, включающим добычу природного газа (ПГ), транспортировку, распределение и переработку ПГ в продукты с высокой добавленной стоимостью [14-16].

Одна из первых статей по математическому моделированию и оптимальной организации ЦП поставок природного газа с использованием методов СЦЛП относится к началу 1960-х [17], затем авторы предложили алгоритмы для решения все более сложных задач оптимизации ЦП и систем газоснабжения.

Один из первых алгоритмов последовательного квадратичного программирования для оптимизации ССГ предложен в работе [18]. В более поздних статьях авторы рассматривают оптимальное проектирование систем трубопроводов с использованием метода декомпозиции [19, 20] и кусочно-линейной линеаризации в сочетании с методом линейного программирования [21]. Алгоритм Лагранжа для решения задачи оптимизации использован в работе [22], а применение методов целочисленного линейного программирования (ЦЛП) предложено в работах [23, 24]. Общая математическая модель систем газоснабжения представлена в работе [25], а в работе [26] авторы предложили алгоритм для одновременной оптимизации процессов добычи и транспортировки нефти и газа, т. е. рассмотрели всю ЦП природного углеводородного сырья. Также для оптимального управления в реальном времени подводными трубопроводами разработана оригинальная упрощенная компьютерная модель нестационарного газового потока в протяженном многослойно-изолированном подводном газопроводе высокого давления [27, 28].

Методы оптимизации в условиях неопределенности данных для стадии эксплуатации производства НГХК представлены в работе [29], а использование метода нелинейного программирования для проектирования ССГ показано в работе [30]. При решении задачи невыпуклой оптимизации для распределительной ССГ применены нелинейные математические модели [31] с использованием алгоритма поиска глобального экстремума для задач нелинейного и смешанного целочисленного нелинейного программирования (СЦНЛП) [32]. В работах [33] и [34] предложены алгоритмы оптимального управления ССГ в стационарных и нестационарных режимах.

Учет затрат и финансовых показателей в целевых функциях и в ограничениях при формулировке общей постановки задачи оптимизации сложных газопроводов имеет важное значение для обеспечения конкурентоспособности ЦП природного газа, включающих добычу, транспортировку газа, его распределение и переработку. В работе [35] изложены методы оптимизации производственных и бизнес-процессов на нефтяных месторождениях, а в работе [36] авторы расширили постановку задачи оптимизации для операции добычи природного газа в ЦП. В работе [37] предложена математическая постановка задачи минимизации затрат для проектируемых ССГ. Учет спотовых и фьючерсных цен на рынках химических товаров (с особым акцентом на рынки нефти и газа) изложен в статье [38], а значимость учета рыночной конкуренции при оптимизации ССГ – в работе [39].

Задача организации технического обслуживания и ремонта инфраструктуры ССГ при различных собственниках предприятий – участников ЦП проанализирована в статье [40]. В работе [41] предложен общий алгоритм работы СЦЛП для решения задач финансовой оптимизации структуры ЦП. Оценка затрат на операции хранения в ЦП рассмотрена в работе [42], тогда как задача оптимизации краткосрочных портфелей заказов решена в работе [43]. Задача оптимизации инвестиций в инжиниринг ССГ изложена в статье [44]. Полная математическая модель ЦП для НГХК с учетом инженерно-физических и финансовых ограничений и финансово-экономических целевых функций предложена в работах [6, 15, 16].

Задача оптимизации портфеля заказов для ЦП предполагает использование стохастической модели и процедуры двухстадийной оптимизации сложных ХТС [45]. Стохастические переменные присутствуют как в ограничениях, так и в целевой функции, которая предусматривает максимизацию ожидаемой прибыли с учетом денежных потоков и финансовых затрат.

Необходимость учета факторов воздействия на ОС производств и ЦП химического комплекса НГХК привел к разработке новых методов эколого-экономической оптимизации для решения задачи оптимизации ССГ. Некоторые фундаментальные понятия оптимизации изложены в работах [46-48], обширный аналитический обзор по этой теме представлен в работе [49]. Конкретные особенности цепей поставок в НГХК рассмотрены в работах [50-52], в то время как учет оценки ЖЦ при описании комплексной модели цепи поставок НГХК предложен в работах [6, 16]. Постановка и методы решения задачи оптимизации «зеленых» ЦП в НГХК представлены в работе [53, 54].

Таким образом, при разработке комплексной математической модели оптимизации ОФС и многокритериального планирования ЦП природного газа для предприятий НГХК с учетом рыночных и экологических факторов необходимо использовать совместно методы стохастического программирования и методы многокритериальной оптимизации.

Кроме того, обосновано, что при решении общей задачи оптимизации ЦП в связи с существенным воздействием выбросов парниковых газов на глобальное потепление, необходимо учитывать утечки метана при разработке общей математической модели ЦП природного газа [13, 55-59].

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ, ЦИФРОВИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ И БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПРИ ИНЖИНИРИНГЕ ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕКТИВНЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В решении задач инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных ХТС принципиальное значение имеет применение научно-обоснованных комплексных методов как обеспечения оптимальных показателей надежности и технологической безопасности ХТС и территориальных систем газоснабжения [60], так и цифровизированного управления и минимизации различного вида рисков производств и цепей поставок НГХК [61].

В работе [62] развиты теоретические основы анализа риска и цифровизированного управления безопасностью ХТС. Предложены логико-информационные, логические и вероятностные модели анализа и оценки риска возникновения аварий для различных классов объектов НГХК. Сформулирована формализованная постановка задач управления безопасностью ХТС и разработаны производственные правила [14] принятия решений по

оперативному управлению безопасностью ХТС на основе предотвращения возникновения отказов и аварийных ситуаций на ХТС [60]. Развита методика цифровизированного управления безопасностью ХТС с использованием современных программно-информационных инструментов, методов системного анализа ХТС, методов и принципов создания интеллектуальных интегрированных АСУ безопасностью производств НГХК [62-64].

В работе [65] предложено использовать системный подход к решению проблемы управления безопасным обращением с химической продукцией на всех ее стадиях жизненного цикла и по всей ЦП предприятий НГХК. Разработана функциональная структура информационно-аналитической системы управления безопасным обращением с химической продукцией, предложен алгоритм классификации видов опасностей химической продукции в условиях неопределенности.

Предложены основные принципы и методология самоорганизации (СО) свойств надежности и безопасности энергоресурсоэффективных ХТС, которые обладают свойством внутренней надёжности, на основе эвристического алгоритма, включающего последовательность процедур обработки декларативным методом описания исходных данных. Принципы СО базируются на логическом представлении знаний в виде производственных метаправил самоорганизации и обеспечивают выполнение специальных свойств как ХТС в целом, так и их элементов, на основе методов интеллектуальной обработки данных и применения методов теории искусственного интеллекта [14]. Исходные данные описывают воздействующие на ХТС факторы и технические требования [66].

Для синтеза энергоресурсоэффективных ХТС с оптимальными показателями надежности и безопасности разработана интеллектуальная инструментальная система (ИИС), включающая интеллектуальный планировщик, решатель мультидисциплинарных задач, базы знаний и данных, онтологию, экспертные системы (ЭС) и вычислительные модули (ВМ). Функциональная ИИС обеспечивает самоадаптацию и взаимосвязанность структуры ЭС, ВМ и БД, релевантных конкретной задаче синтеза свойства ХТС [67-68].

Интеллектуальный планировщик реализует алгоритм самоорганизации, решатель непосредственно обеспечивает решение задачи на основе самоорганизованной архитектуры ЭС, ВМ и БД. Подсистема онтологии ИИС предназначена для формирования единого смыслового информационного пространства ИИС. Производственные метаправила и правила самоорганизации, проблемно-ориентированные алгоритмы решения задач могут

формироваться и включаться в ИИС в процессе решения задач на основе обеспечения согласования мнений экспертов.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ, НЕФТЕХИМИИ И БИОТЕХНОЛОГИИ»

По инициативе академика РАН Саркисова П.Д. – ректора Российского химико-технологического университета (РХТУ) им. Д.И. Менделеева, при активном творческом участии академика РАН Мешалкина В.П. и при большой организационной и учебно-методической работе профессора, д.т.н. Е.А. Дмитриева в 2001 г. было открыто в Российской Федерации новое направление многоуровневой подготовки кадров «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» [69].

В настоящее время по этому направлению активно ведется подготовка бакалавров технологии и магистров технологии в РХТУ, Казанском национальном исследовательском университете, Ивановском государственном химико-технологическом университете, Уфимском государственном нефтяном технологическом университете, в Санкт-Петербургском Государственном технологическом институте (ТУ).

Кафедра Логистики и Экономической Информатики (ЛогЭКИ) РХТУ с 2001 г. обучает бакалавров технологии и магистров технологии, активно используя при составлении основных образовательных программ (ООП) по направлению «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», изложенные в настоящем аналитическом обзоре современные научные методы и цифровизированные инструменты инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных химических технологий и наукоемких ХТС, цепей поставок и систем газоснабжения НГХК.

Следует особо подчеркнуть, что важнейшие разделы ООП по уникальной специальности “Chemical Process Engineering” (Инжиниринг Химико-Технологических Систем), которые разработаны и активно используются в ряде ведущих университетов мира: Imperial College (London, UK), University Polytechnic of Catalonia (Spain), South Bank Polytechnic University (London, UK), The University of Manchester (UK), Carnegie Mellon University (USA), в значительной степени совпадают с

ООП по направлению «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии нефтехимии и биотехнологии».

Выпускники кафедры ЛогЭКИ – бакалавры и магистры, получая один диплом, имеют фактически три квалификации — «технолога», «логиста» и «управленца-организатора», поэтому они могут успешно решать следующие сложные важные задачи повышения экономической эффективности и конкурентоспособности ХТС, предприятий и цепей поставок химического и нефтегазохимического комплекса в условиях цифровой экономики:

- инжиниринг оптимальных технологических схем и автоматизированных систем управления эксплуатацией энергоресурсосберегающих производств и цепей поставок; управление проектами по инжинирингу энергоресурсосберегающих экологически безопасных производств и цепей поставок НГХК;
- анализ и управление производственными, финансовыми и экологическими рисками промышленных предприятий и цепей поставок, методы интенсификации химико-технологических процессов ХТС;
- составление планов стратегического, тактического и оперативного управления энергоресурсосбережением на промышленных предприятиях и в цепях поставок НГХК; организация цифровизации производства НГХК;
- организация и проведение энергетического аудита на промышленных, коммерческих и коммунально-бытовых предприятиях;
- оптимизация энергоресурсоэффективности производств, предприятий и цепей НГХК и малотоннажной химии;
- выбор и практическое использование корпоративных информационных систем логистического управления технологическими процессами, бизнес-процессами и материальными ресурсами предприятий, инжиниринг логистических систем управления «зелеными» цепями поставок продукции НГХК.

Все выпускники кафедры ЛогЭКИ после успешного обучения в РХТУ им. Д.И. Менделеева получают уникальную «широкую технологическо-управленческую квалификацию», которая позволяет им в условиях цифровизации успешно работать в различных отраслях и сферах деятельности экономики России и индустриально развитых государств:

В области инжиниринга и организационно-технической деятельности: на производственных

предприятиях, в инжиниринговых центрах и консультативных центрах, в проектных организациях и научно-исследовательских институтах, в вертикально-интегрированных компаниях нефтегазохимического, топливно-энергетического и химического комплекса.

В области логистики и управления ЦП, организационно-экономической и административно-управленческой деятельности в сфере: производства; материально-технического обеспечения; цифрового предпринимательства; логистики складирования и транспорта; цифровой коммерции; оказания услуг; государственного и муниципального управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИНЖИНИРИНГУ ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕКТИВНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для успешной реализации основных целей устойчивого развития человечества и создания безотходной, или «круговой», цифровой экономики в условиях промышленной революции «Индустрия 4.0» с учетом концепции конвергенции «Нано-Био-Информационно-Когнитивно-Социальных» (НБИКС) технологий необходимо особое внимание уделять проведению фундаментальных и прикладных НИР в области инжиниринга высокоинтенсивных энергоресурсоэффективных химических технологий и экологически безопасных ХТС, по следующим приоритетным направлениям, которые в 2019 г. приняты решением XXI Менделеевского съезда, по предложению членов секции Съезда «Энергоресурсоэффективность, экологическая безопасность и управление рисками производств, предприятий и цепей поставок НГХК»:

- методы интенсификации, комбинирования и минитюаризации ХТП;
- методы цифровизованного инжиниринга и логистического управления эксплуатацией энергоресурсоэффективных экологически безопасных наукоемких химико-технологических систем и ЦП предприятий химического, нефтегазохимического, биохимического, фармацевтического и химико-металлургического комплекса;
- методы и способы рационального природопользования с широким применением возобновляемых природных ресурсов;
- методы комбинированной энергоресурсоэффективной экологически безопасной переработки промышленных и коммунальных бытовых отходов и стоков;

- методы цифровизованного инжиниринга безотходных природоподобных ХТП и ХТС и инжиниринг «зеленых» ЦП в реальном секторе экономики;

- методы многомасштабного компьютерного моделирования ХТП, структуры веществ и композиционных материалов;

- методы компьютерной оптимизации и автоматизированного синтеза энергоресурсоэффективных ХТС и ЦП;

- методы инжиниринга цифровизованных робото-кибернетических интеллектуальных производств и предприятий химического, нефтегазохимического, биохимического, фармацевтического и химико-металлургического комплекса;

- методы компьютерной оценки воздействия на ОС техногенных систем;

- методы оценки энергоресурсоэффективности этапов жизненного цикла продукции НГХК;

- методы минимизации экологических, производственных, предпринимательских и финансовых рисков для предприятий химического, нефтегазохимического, биохимического, фармацевтического и химико-металлургического комплекса.

Ученые химики и химики-технологии, работающие в российских университетах и в НИИ Российской Академии Наук, должны особое внимание уделять постоянному совершенствованию и актуализации на основе всестороннего использования современных достижений теоретической и прикладной химии, теории инжиниринга энергоресурсоэффективных ХТС, а так же цифровизованных инструментов промышленной революции «Индустрия 4.0» программ многоуровневого химического и химико-технологического образования при подготовке высококвалифицированных компетентных кадров, которые могут успешно решать задачи инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных устойчивых производств, предприятий и цепей поставок химического, биохимического, биометаллургического и нефтегазохимического комплекса.

Автор аналитического обзора благодарит магистранта кафедры Логистики и экономической информатики РХТУ им. Д.И. Менделеева Баранову Я.П. за большую помощь при техническом оформлении текста обзора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30024).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Meshalkin V.P.** Energy-saving technology performance and efficiency indexes. *Chem. Eng. Trans.* 2009. V. 18 P. 953-958. DOI: 10.3303/CET0918156.
2. **Grossmann I.E., Harjunkski I.** Process Systems Engineering: Academic and Industrial Perspectives. *Comput. Chem. Eng.* 2019. V. 126. N 12. P. 474-484. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.04.028.
3. **Мешалкин В.П.** Ресурсоэнергоэффективные методы энергообеспечения и минимизации отходов нефтеперерабатывающих производств: основы теории и наилучшие практические результаты. М.: Генуя: Химия. 2009. 393 с.
4. **Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А.** Основы энергоресурсоэффективных экологически безопасных технологий нефтепереработки. Харьков: НТУ «Харьковский политехнический институт». 2011. 616 с.
5. **Кафаров В.В., Мешалкин В.П.** Анализ и синтез химико-технологических систем. М.: Химия. 1991. 432 с.
6. **Мешалкин В.П.** Введение в инжиниринг энергоресурсосберегающих химико-технологических систем. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2020. 212 с.
7. **Мешалкин В.П., Дли М.И.** Логистика и управление конкурентоспособностью предприятий нефтехимического комплекса. М.: Генуя: Химия. 2010. 452 с.
8. European Roadmap for process Intensification URL: https://efce.info/efce_media/-p-531.pdf [Retrieved 21.01.2021].
9. **Harmsen J.** Process intensification in the petrochemicals industry: Drivers and hurdles for commercial implementation. *Chem. Eng. Proc.: Process Intensification*. 2010. V. 49. P. 70-73. DOI: 10.1016/j.ccep.2009.11.009.
10. **Becht S., Franke R., Geißelmann A., Hahn H.A.** An industrial view of process intensification. *Chem. Eng. Proc.: Process Intensification*. 2009. V. 48. P. 329-332. DOI: 10.1016/j.ccep.2008.04.012.
11. **Frerich J. Keil.** Process Intensification. *Rev. in Chem. Eng.* 2018. V. 34 N 2. P. 135 –200. DOI: 10.1515/revce-2017-0085.
12. **Sitter S., Chen Q., Grossmann I.E.** An Overview of Process Intensification Methods. *Curr. Opinion in Chem. Eng.* 2019. N 25. P. 87-98. DOI: 10.1016/j.coche.2018.12.006.
13. **Dovi M.-S., Meshalkin V.P.** Mathematical methods for the multi-criteria optimization of structure and management of energy efficient gas supply chains. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2017. V. 51. P. 1080-1091. DOI: 10.1134/S0040579517060033.
14. **Мешалкин В.П.** Экспертные системы в химической технологии: Основы теории, опыт разработки и применения. М.: Химия. 1995. 368 с.
15. **Мешалкин В.П., Дови В., Марсанич А.** Принципы промышленной логистики. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2002. 722 с.
16. **Мешалкин В.П., Дови В., Марсанич А.** Стратегия управления логистическими цепями химической продукции и устойчивое развитие. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2003. 542 с.
17. **Dam J. Van.** Planning of optimum production from a natural gas field. *J. Inst. Petrol.* 1968. V. 54. P. 55-67.
18. **Furey B.P.** A sequential quadratic programming-based algorithm for optimization of gas networks. *Automatica*. 1993. V. 29. N 4. P. 1439-1450. DOI: 10.1016/0005-1098(93)90008-H.
19. **De Wolf D., Smeers Y.** Optimal dimensioning of pipe networks with application to gas transmission networks. *Oper. Res.* 1996. V. 44. N 4. P. 596. DOI: 10.1287/opre.44.4.596.
20. **Meshalkin V.P., Kokhov T.A., Gartman T.N., Korelstein L.B.** Heuristic Topological Decomposition Algorithm for Optimal Energy-Resource-Efficient Routing of Complex Process Pipeline Systems. *Doklady Chem.* 2018. V. 482. N 2. P. 246-250. DOI: 10.1134/S0012500818100087.

REFERENCES

1. **Meshalkin V.P.** Energy-saving technology performance and efficiency indexes. *Chem. Eng. Trans.* 2009. V. 18 P. 953-958. DOI: 10.3303/CET0918156.
2. **Grossmann I.E., Harjunkski I.** Process Systems Engineering: Academic and Industrial Perspectives. *Comput. Chem. Eng.* 2019. V. 126. N 12. P. 474-484. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.04.028.
3. **Meshalkin V.P.** Resource- and Energy-Efficient Energy Supply and Waste Minimization Techniques for Refineries: Theoretical Fundamentals and Best Practices. M.: Genuya: Khimiya. 2009. 393 p. (in Russian).
4. **Meshalkin V.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A.** Fundamentals of Energy-Efficient Environmentally Friendly Refining Technologies. Khar'kov: NTU «Khar'kovskiy politekhnicheskii institut». 2011. 616 p. (in Russian).
5. **Kafarov V.V., Meshalkin V.P.** Analysis and Synthesis of Chemical Process Systems. M.: Khimiya. 1991. 432 p. (in Russian).
6. **Meshalkin V.P.** Introduction to the Engineering of Energy and Resource Saving Chemical Process Systems. M.: Genuya: Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. 2020. 212 p. (in Russian).
7. **Meshalkin V.P., Dli M.I.** Logistics and Competitiveness Management of Petrochemical Enterprises. M.: Genuya: Khimiya. 2010. 452 p. (in Russian).
8. European Roadmap for process Intensification URL: https://efce.info/efce_media/-p-531.pdf [Retrieved 21.01.2021].
9. **Harmsen J.** Process intensification in the petrochemicals industry: Drivers and hurdles for commercial implementation. *Chem. Eng. Proc.: Process Intensification*. 2010. V. 49. P. 70-73. DOI: 10.1016/j.ccep.2009.11.009.
10. **Becht S., Franke R., Geißelmann A., Hahn H.A.** An industrial view of process intensification. *Chem. Eng. Proc.: Process Intensification*. 2009. V. 48. P. 329-332. DOI: 10.1016/j.ccep.2008.04.012.
11. **Frerich J. Keil.** Process Intensification. *Rev. in Chem. Eng.* 2018. V. 34 N 2. P. 135 –200. DOI: 10.1515/revce-2017-0085.
12. **Sitter S., Chen Q., Grossmann I.E.** An Overview of Process Intensification Methods. *Curr. Opinion in Chem. Eng.* 2019. N 25. P. 87-98. DOI: 10.1016/j.coche.2018.12.006.
13. **Dovi M.-S., Meshalkin V.P.** Mathematical methods for the multi-criteria optimization of structure and management of energy efficient gas supply chains. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2017. V. 51. P. 1080-1091. DOI: 10.1134/S0040579517060033.
14. **Meshalkin V.P.** Expert Systems in Chemical Engineering: Fundamentals of Theory, Development and Application Experience. M.: Khimiya. 1995. 368 p. (in Russian).
15. **Meshalkin V.P., Dovi V., Marsanich A.** Industrial Logistics Principles. M.: Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. 2002. 722 p. (in Russian).
16. **Meshalkin V.P., Dovi V., Marsanich A.** Chemical Supply Chain Management Strategy and Sustainable Development. M.: Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. 2003. 542 p. (in Russian).
17. **Dam J. Van.** Planning of optimum production from a natural gas field. *J. Inst. Petrol.* 1968. V. 54. P. 55-67.
18. **Furey B.P.** A sequential quadratic programming-based algorithm for optimization of gas networks. *Automatica*. 1993. V. 29. N 4. P. 1439-1450. DOI: 10.1016/0005-1098(93)90008-H.
19. **De Wolf D., Smeers Y.** Optimal dimensioning of pipe networks with application to gas transmission networks. *Oper. Res.* 1996. V. 44. N 4. P. 596. DOI: 10.1287/opre.44.4.596.
20. **Meshalkin V.P., Kokhov T.A., Gartman T.N., Korelstein L.B.** Heuristic Topological Decomposition Algorithm for Optimal Energy-Resource-Efficient Routing of Complex Process Pipeline Systems. *Doklady Chem.* 2018. V. 482. N 2. P. 246-250. DOI: 10.1134/S0012500818100087.

21. **De Wolf D., Smeers Y.** The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm. *Manag. Sci.* 2000. V. 46. N 11. P. 1454-1465. DOI: 10.1287/mnsc.46.11.1454.12087.
22. **Van den Heever S.A., Grossmann I.E., Vasantharajan S., Edwards K.A.** A lagrangean decomposition heuristic for the design and planning of offshore hydrocarbon field infrastructures with complex economic objectives. *Indust. Eng. Chem. Res.* 2001. V. 40. N 2857-2875. DOI: 10.1021/ie000755e.
23. **Ortíz-Gómez A., Rico-Ramírez V., Hernández-Castro S.** Mixed-integer multiperiod model for the planning of oilfield production. *Comput. Chem. Eng.* 2002. V. 26. P. 703-712. DOI: 10.1016/S0098-1354(01)00778-5.
24. **Martin A., Möller M., Moritz S.** Mixed integer models for the stationary case of gas network optimization. *Mathem. Progr. Progr.* 2006. V. 105. P. 563-582. DOI: 10.1007/s10107-005-0665-5.
25. **Nimmanonda P., Uraikul V., Chan C.W., Tontiwachwuthikul P.** Computer-aided simulation model for natural gas pipeline network system operations. *Indust. Eng. Chem. Res.* 2004. V. 43. P. 990. DOI: 10.1021/ie030268+.
26. **Barragán-Hernández V., Vázquez-Román R., Rosales-Marines L., García-Sánchez F.A.** A strategy for simulation and optimization of gas and oil production. *Comput. Chem. Eng.* 2005. V. 30. N 2. P. 215-227.
27. **Meshalkin V.P., Chionov A.M., Kazak A.S., Aristov V.M.** A computer model of the nonstationary gas flow in a long multilayer-insulated high-pressure subsea gas pipeline. *Doklady Chem.* 2016. V. 469. N 2. P. 241-244. DOI: 10.1134/S0012500816080048.
28. **Meshalkin V.P., Chionov A.M., Kazak A.S., Aristov V.M.** Applied computer model of the non-stationary gas flow in a long multilayer-insulated high-pressure subsea gas pipeline. *Doklady Chem.* 2016. V. 470. N 1. P. 279-282. DOI: 10.1134/S0012500816090020.
29. **Goel V.V., Grossmann I.E., El-Bakry A.S., Mulkay E.L.** A novel branch and bound algorithm for optimal development of gas fields under uncertainty in reserves. *Comput. Chem. Eng.* 2006. V. 3. P. 1076-1092. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2006.02.006.
30. **Kabirian A., Hemmati M.R.** A strategic planning model for natural gas transmission networks. *Energy Policy.* 2007. V. 35. P. 5656-5670. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.05.022.
31. **Wu Y., Lai K.K., Liu Y.** Deterministic global optimisation approach to steady-state distribution gas pipeline networks (In special issue: Optimization and Control Applications). *Optim. Eng.* 2007. V. 8. N 3. P. 259-275. DOI: 10.1007/s11081-007-9018-y.
32. **Floudas C.A., Aggarwal A., Ciric A.R.** Strategies for Overcoming Uncertainties In Heat Exchanger Network Synthesis. *Comput. Chem. Eng.* 1989. V. 13. N 10. P. 1117-1132. DOI: 10.1016/0098-1354(89)87016-4.
33. **Osiadacz A.J.** Steady state optimisation of gas networks. *Arch. Min. Sci.* 2011. V. 56. P. 335-352.
34. **Osiadacz A.J., Chaczykowski M.** Dynamic Control for Gas Pipeline Systems. *Arch. Min. Sci.* 2016. V. 61. N 1. P. 69-82. DOI: 10.1515/amsc-2016-0006.
35. **Jonsbråten T.W.** Oil field optimization under price uncertainty. *J. Operat. Res. Soc.* 1998. V. 49. N 8. P. 811. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2600562.
36. **Chermak J.M., Crafton J., Norquist S.M., Patrick R.H.** A hybrid economic-engineering model for natural gas production. *Energy Econom.* 1999. V. 21. N 2. P. 67-94. DOI: 10.1016/S0140-9883(98)00004-8.
37. **Wu S., Ríos-Mercado R.Z.E., Boyd A., Scott L.R.** Model relaxations for the fuel cost minimization of steady-state gas pipeline networks. *Mathem. Comp. Model.* 2000. V. 31. N 2. P. 197-220. DOI: 10.1016/S0895-7177(99)00232-0.
21. **De Wolf D., Smeers Y.** The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm. *Manag. Sci.* 2000. V. 46. N 11. P. 1454-1465. DOI: 10.1287/mnsc.46.11.1454.12087.
22. **Van den Heever S.A., Grossmann I.E., Vasantharajan S., Edwards K.A.** A lagrangean decomposition heuristic for the design and planning of offshore hydrocarbon field infrastructures with complex economic objectives. *Indust. Eng. Chem. Res.* 2001. V. 40. N 2857-2875. DOI: 10.1021/ie000755e.
23. **Ortíz-Gómez A., Rico-Ramírez V., Hernández-Castro S.** Mixed-integer multiperiod model for the planning of oilfield production. *Comput. Chem. Eng.* 2002. V. 26. P. 703-712. DOI: 10.1016/S0098-1354(01)00778-5.
24. **Martin A., Möller M., Moritz S.** Mixed integer models for the stationary case of gas network optimization. *Mathem. Progr.* 2006. V. 105. P. 563-582. DOI: 10.1007/s10107-005-0665-5.
25. **Nimmanonda P., Uraikul V., Chan C.W., Tontiwachwuthikul P.** Computer-aided simulation model for natural gas pipeline network system operations. *Indust. Eng. Chem. Res.* 2004. V. 43. P. 990. DOI: 10.1021/ie030268+.
26. **Barragán-Hernández V., Vázquez-Román R., Rosales-Marines L., García-Sánchez F.A.** A strategy for simulation and optimization of gas and oil production. *Comput. Chem. Eng.* 2005. V. 30. N 2. P. 215-227.
27. **Meshalkin V.P., Chionov A.M., Kazak A.S., Aristov V.M.** A computer model of the nonstationary gas flow in a long multilayer-insulated high-pressure subsea gas pipeline. *Doklady Chem.* 2016. V. 469. N 2. P. 241-244. DOI: 10.1134/S0012500816080048.
28. **Meshalkin V.P., Chionov A.M., Kazak A.S., Aristov V.M.** Applied computer model of the non-stationary gas flow in a long multilayer-insulated high-pressure subsea gas pipeline. *Doklady Chem.* 2016. V. 470. N 1. P. 279-282. DOI: 10.1134/S0012500816090020.
29. **Goel V.V., Grossmann I.E., El-Bakry A.S., Mulkay E.L.** A novel branch and bound algorithm for optimal development of gas fields under uncertainty in reserves. *Comput. Chem. Eng.* 2006. V. 3. P. 1076-1092. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2006.02.006.
30. **Kabirian A., Hemmati M.R.** A strategic planning model for natural gas transmission networks. *Energy Policy.* 2007. V. 35. P. 5656-5670. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.05.022.
31. **Wu Y., Lai K.K., Liu Y.** Deterministic global optimisation approach to steady-state distribution gas pipeline networks (In special issue: Optimization and Control Applications). *Optim. Eng.* 2007. V. 8. N 3. P. 259-275. DOI: 10.1007/s11081-007-9018-y.
32. **Floudas C.A., Aggarwal A., Ciric A.R.** Strategies for Overcoming Uncertainties In Heat Exchanger Network Synthesis. *Comput. Chem. Eng.* 1989. V. 13. N 10. P. 1117-1132. DOI: 10.1016/0098-1354(89)87016-4.
33. **Osiadacz A.J.** Steady state optimisation of gas networks. *Arch. Min. Sci.* 2011. V. 56. P. 335-352.
34. **Osiadacz A.J., Chaczykowski M.** Dynamic Control for Gas Pipeline Systems. *Arch. Min. Sci.* 2016. V. 61. N 1. P. 69-82. DOI: 10.1515/amsc-2016-0006.
35. **Jonsbråten T.W.** Oil field optimization under price uncertainty. *J. Operat. Res. Soc.* 1998. V. 49. N 8. P. 811. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2600562.
36. **Chermak J.M., Crafton J., Norquist S.M., Patrick R.H.** A hybrid economic-engineering model for natural gas production. *Energy Econom.* 1999. V. 21. N 2. P. 67-94. DOI: 10.1016/S0140-9883(98)00004-8.
37. **Wu S., Ríos-Mercado R.Z.E., Boyd A., Scott L.R.** Model relaxations for the fuel cost minimization of steady-state gas pipeline networks. *Mathem. Comp. Model.* 2000. V. 31. N 2. P. 197-220. DOI: 10.1016/S0895-7177(99)00232-0.
38. **Pindyck R.S.** The dynamics of commodity spot and futures markets: a primer. *Energy J.* 2001. V. 22. N 3. P. 1-12. DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol22-No3-1.

38. **Pindyck R.S.** The dynamics of commodity spot and futures markets: a primer. *Energy J.* 2001. V. 22. N 3. P. 1-12. DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol22-No3-1.
39. **Cremer H., Gasmi F., Laffont J.J.** Access to Pipelines for Competitive Gas Markets. *J. Regul. Econom.* 2003. V. 24. N 1. P. 5-33. DOI: 10.1023/A:1023943613605.
40. **Papadakis I.S., Kleindorfer P.R.** Optimizing infrastructure network maintenance when benefits are interdependent. *Or Spectrum.* 2005. V. 27. P. 63-84. DOI: 10.1007/s00291-004-0167-5.
41. **Contesse L., Ferrer J.C., Maturana S.A.** Mixed-Integer Programming Model for Gas Purchase and Transportation. *Ann. Operat. Res.* 2005. V. 139. N 1. P. 39-63. DOI: 10.1007/s10479-005-3443-0.
42. **Chen Z., Forsyth P.A.** A semi-Lagrangian approach for natural gas storage valuation and optimal operation. *SIAM J. Sci. Comp.* 2007. V. 30. P. 339-368. DOI: 10.1137/060672911.
43. **Chen H., Baldick R.** Optimizing short-term natural gas supply portfolio for electric utilities companies. *IEEE Transact. Power Syst.* 2007. V. 22. N 1. P. 232-239. DOI: 10.1109/TPWRS.2006.889144.
44. **Davidson R.A., Lembo A.J., Ma J., Nozick L.K., O'Rourke T.D.** Optimization of investments in natural gas distribution networks. *J. Energy Eng.* 2006. V. 132. N 2. P. 1-9. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9402(2006)132:2(52).
45. **Sen S.** Algorithms for Stochastic Mixed-Integer Programming Models. In *Handbooks in OR & MS* (Eds: K. Aardal et al). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. 2005. V. 12. Chap. 9. P. 511-558. DOI: 10.1016/S0927-0507(05)12009-X.
46. **Бутусов О.Б., Ковнеристый Ю.К., Мешалкин В.П., Митин С.Г.** Эколого-экономический анализ промышленных предприятий. М.: Воскресенье. 2003. 324 с.
47. **Мешалкин В.П., Бутусов О.Б.** Компьютерная оценка воздействия на окружающую среду магистральных трубопроводов. М.: ИНФРА-М. 2010. 449 с.
48. **Hugo A., Pistikopoulos E.** Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks. *J. Cleaner Prod.* 2005. V. 13. P. 1471-1491. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.04.011.
49. **Srivastava S.** Green supply chain management: a state of the art literature review. *Internat. J. Manag. Rev.* 2007. V. 9. P. 53-80. DOI: 10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x.
50. **Guillén-Gosálbez G., Grossmann I.** Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty. *AIChE J.* 2009. V. 55. P. 99-121. DOI: 10.1002/aic.11662.
51. **Guillén-Gosálbez G., Grossmann I.** A global optimization strategy for the environmentally conscious design of chemical supply chains under uncertainty in the damage assessment mode. *Comput. Chem. Eng.* 2010. V. 34. P. 42-58. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.09.003.
52. **Ruiz-Femenia R., Guillén-Gosálbez G., Jiménez L., Caballero J.** Multi-objective optimization of environmentally conscious chemical supply chains under demand uncertainty. *Chem. Eng. Sci.* 2013. V. 95. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.ces.2013.02.054.
53. **Bojarski A., Lainez J., Espuña A., Puigjaner L.** Incorporating environmental impacts and regulations in a holistic supply chains modeling: An LCA approach. *Comput. Chem. Eng.* 2009. V. 33. N 10. P. 1747-1759. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.04.009.
54. **Bekkering J., Broekhuis A.A., Van Gernert W.J.T.** Optimisation of a green gas supply chain – A review. *Bioresource Technol.* 2010. V. 101. P. 450-456. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.106.
55. **Alfaki M., Haugland D.** Strong formulations for the pooling problem. *J. Glob. Optim.* 2013. V. 56. N 3. P. 897-916. DOI: 10.1007/s10898-012-9875-6.
39. **Cremer H., Gasmi F., Laffont J.J.** Access to Pipelines for Competitive Gas Markets. *J. Regul. Econom.* 2003. V. 24. N 1. P. 5-33. DOI: 10.1023/A:1023943613605.
40. **Papadakis I.S., Kleindorfer P.R.** Optimizing infrastructure network maintenance when benefits are interdependent. *Or Spectrum.* 2005. V. 27. P. 63-84. DOI: 10.1007/s00291-004-0167-5.
41. **Contesse L., Ferrer J.C., Maturana S.A.** Mixed-Integer Programming Model for Gas Purchase and Transportation. *Ann. Operat. Res.* 2005. V. 139. N 1. P. 39-63. DOI: 10.1007/s10479-005-3443-0.
42. **Chen Z., Forsyth P.A.** A semi-Lagrangian approach for natural gas storage valuation and optimal operation. *SIAM J. Sci. Comp.* 2007. V. 30. P. 339-368. DOI: 10.1137/060672911.
43. **Chen H., Baldick R.** Optimizing short-term natural gas supply portfolio for electric utilities companies. *IEEE Transact. Power Syst.* 2007. V. 22. N 1. P. 232-239. DOI: 10.1109/TPWRS.2006.889144.
44. **Davidson R.A., Lembo A.J., Ma J., Nozick L.K., O'Rourke T.D.** Optimization of investments in natural gas distribution networks. *J. Energy Eng.* 2006. V. 132. N 2. P. 1-9. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9402(2006)132:2(52).
45. **Sen S.** Algorithms for Stochastic Mixed-Integer Programming Models. In *Handbooks in OR & MS* (Eds: K. Aardal et al). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. 2005. V. 12. Chap. 9. P. 511-558. DOI: 10.1016/S0927-0507(05)12009-X.
46. **Butusov O.B., Kovneristy Yu.K., Meshalkin V.P., Mitin S.G.** Ecological and Economic Analysis of Industrial Enterprises. М.: Voskresen'ye. 2003. 324 p. (in Russian).
47. **Meshalkin V.P., Butusov O.B.** Computer-aided Assessment of the Environmental Impact of Trunk Pipelines, (in Russian). М.: INFRA-M. 2010. 449 p. (in Russian).
48. **Hugo A., Pistikopoulos E.** Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks. *J. Cleaner Prod.* 2005. V. 13. P. 1471-1491. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.04.011.
49. **Srivastava S.** Green supply chain management: a state of the art literature review. *Internat. J. Manag. Rev.* 2007. V. 9. P. 53-80. DOI: 10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x.
50. **Guillén-Gosálbez G., Grossmann I.** Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty. *AIChE J.* 2009. V. 55. P. 99-121. DOI: 10.1002/aic.11662.
51. **Guillén-Gosálbez G., Grossmann I.** A global optimization strategy for the environmentally conscious design of chemical supply chains under uncertainty in the damage assessment mode. *Comput. Chem. Eng.* 2010. V. 34. P. 42-58. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.09.003.
52. **Ruiz-Femenia R., Guillén-Gosálbez G., Jiménez L., Caballero J.** Multi-objective optimization of environmentally conscious chemical supply chains under demand uncertainty. *Chem. Eng. Sci.* 2013. V. 95. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.ces.2013.02.054.
53. **Bojarski A., Lainez J., Espuña A., Puigjaner L.** Incorporating environmental impacts and regulations in a holistic supply chains modeling: An LCA approach. *Comput. Chem. Eng.* 2009. V. 33. N 10. P. 1747-1759. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.04.009.
54. **Bekkering J., Broekhuis A.A., Van Gernert W.J.T.** Optimisation of a green gas supply chain – A review. *Bioresource Technol.* 2010. V. 101. P. 450-456. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.106.
55. **Alfaki M., Haugland D.** Strong formulations for the pooling problem. *J. Glob. Optim.* 2013. V. 56. N 3. P. 897-916. DOI: 10.1007/s10898-012-9875-6.
56. **Kolodziej S., Castro P.M., Grossmann I.E.** Global optimization of bilinear programs with a multiparametric disaggregation technique. *J. Glob. Optim.* 2013. V. 57. N 4. P. 1039-1063. DOI: 10.1007/s10898-012-0022-1.

56. **Kolodziej S., Castro P.M., Grossmann I.E.** Global optimization of bilinear programs with a multiparametric disaggregation technique. *J. Glob. Optim.* 2013. V. 57. N 4. P. 1039-1063. DOI: 10.1007/s10898-012-0022-1.
57. **Midthun K.T., Mette B., Tomasgard A.** Modeling Optimal Economic Dispatch and System Effects in Natural Gas Networks. *Energy J.* 2009. V. 30. P. 155-180. DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol30-No4-6.
58. **Kall P., Wallace S.W.** Stochastic Programming. Chichester: John Wiley & Sons. 1994. 307 p.
59. **Ferris M.C., Dirkse S.P., Jaglac J.H., Meeraus A.** An extended mathematical programming framework. *Comput. Chem. Eng.* 2009. V. 33. P. 1973-1982. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.06.013.
60. **Gruhn G., Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Neumann W.** Zuverlässigkeit von Chemieanlagen. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 1979. 257 p.
61. **Roy A., Srivastava P., Sinha S.** Risk and reliability assessment in chemical process industries using Bayesian methods. *Rev. Chem. Eng.* 2014. V. 30. N 5. P. 479-499. DOI: 10.1515/revce-2013-0043.
62. **Egorov A.F., Savitskaya T.V., Levushkina S.A., Levushkin A.S.** Intelligent decision support system for controlling the atmospheric air quality. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2010. 44. N 5. P. 326-338. DOI: 10.1134/S0040579510030127.
63. **Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В., Девятьоров А.Н.** Системный анализ химического реактора как объекта управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 9. С. 92-99. DOI: 10.6060/tcct.2017609.5587.
64. **Караневская Т.Н., Шумихин А.Г.** Моделирование технологических процессов в целях алгоритмизации задачи управления объектами промышленной подготовки нефти. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 84-90. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6100.
65. **Sarkisov P.D., Egorov A.F., Savitskaya T.V., Bachkala O.V., Kuz'mina Y.A.** System analysis of safe chemical handling: methods and approaches to predicting and classifying chemical hazards. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2013. V. 47. N 1. P. 22-30. DOI: 10.1134/S0040579513010119.
66. **Берман А.Ф.** Искусственная самоорганизация и эвристический подход для обоснования свойств надежности, живучести и безопасности сложных технических систем. *Пробл. безопас. и чрезвычай. ситуаций.* 2020. № 4. С. 5-21. DOI: 10.36535/0869-4176-2020-04-1.
67. **Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Павлов А.И.** Принципы информационной технологии решения междисциплинарных задач обеспечения техногенной безопасности на основе самоорганизации. *Информ. и матем. технол. в науке и управлении.* 2019. № 2. С. 5-15. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-01.
68. **Meshalkin V.P., Panina E.A., Bykov R.S.** Principles of developing an interactive system for the semantic processing of scientific and technical texts on chemical technology of reagents and ultrapure substances. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2015. V. 49. N 4. P. 422-426. DOI: 10.1134/S0040579515040314.
69. Научно-педагогические школы Менделеевского университета. Под общ. ред. В.А. Колесникова. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2008. 408 с.
57. **Midthun K.T., Mette B., Tomasgard A.** Modeling Optimal Economic Dispatch and System Effects in Natural Gas Networks. *Energy J.* 2009. V. 30. P. 155-180. DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol30-No4-6.
58. **Kall P., Wallace S.W.** Stochastic Programming. Chichester: John Wiley & Sons. 1994. 307 p.
59. **Ferris M.C., Dirkse S.P., Jaglac J.H., Meeraus A.** An extended mathematical programming framework. *Comput. Chem. Eng.* 2009. V. 33. P. 1973-1982. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.06.013.
60. **Gruhn G., Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Neumann W.** Zuverlässigkeit von Chemieanlagen. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 1979. 257 p.
61. **Roy A., Srivastava P., Sinha S.** Risk and reliability assessment in chemical process industries using Bayesian methods. *Rev. Chem. Eng.* 2014. V. 30. N 5. P. 479-499. DOI: 10.1515/revce-2013-0043.
62. **Egorov A.F., Savitskaya T.V., Levushkina S.A., Levushkin A.S.** Intelligent decision support system for controlling the atmospheric air quality. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2010. 44. N 5. P. 326-338. DOI: 10.1134/S0040579510030127.
63. **Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В., Девятьоров А.Н.** Системный анализ химического реактора как объекта управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 9. С. 92-99. DOI: 10.6060/tcct.2017609.5587.
64. **Караневская Т.Н., Шумихин А.Г.** Моделирование технологических процессов для целей алгоритмизации задачи управления объектами промышленной подготовки нефти. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 84-90. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6100.
65. **Sarkisov P.D., Egorov A.F., Savitskaya T.V., Bachkala O.V., Kuz'mina Y.A.** System analysis of safe chemical handling: methods and approaches to predicting and classifying chemical hazards. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2013. V. 47. N 1. P. 22-30. DOI: 10.1134/S0040579513010119.
66. **Berman A.F.** Artificial self-organization and heuristic approach to substantiate the properties of reliability, survivability and safety of complex technical systems. *Probl. Bezopast. Chrezv. Situats.* 2020. N 4. P. 5-21 (in Russian). DOI: 10.36535/0869-4176-2020-04-1.
67. **Berman A.F., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu., Pavlov A.I.** Principles of Information Technology for Solving Interdisciplinary Problems of Ensuring Technogenic Security on the Basis of Self-organization. *Inform. Matem. Tekhnol. Nauke Upravl.* 2019. N 2. P. 5-15 (in Russian). DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-01.
68. **Meshalkin V.P., Panina E.A., Bykov R.S.** Principles of developing an interactive system for the semantic processing of scientific and technical texts on chemical technology of reagents and ultrapure substances. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2015. V. 49. N 4. P. 422-426. DOI: 10.1134/S0040579515040314.
69. Scientific and pedagogical schools of Mendeleev University. Ed. by V.A. Kolesnikov. M.: RKHTU im. D.I. Mendeleev. 2008. 408 p. (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 16.04.2021

Принята к опубликованию (Accepted) 29.06.2021