

DOI: 10.15593/2224-9400/2017.4.09

УДК 621.643: 004.9

**Е.Р. Мошев, Г.С. Мырзин**

ООО «УралПромБезопасность», Пермь, Россия

**В.Д. Белов, Г.А. Устинов**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**АНАЛИЗ МЕТОДОВ, МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ  
КАК ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ  
ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ТРУБОПРОВОДНЫХ  
СИСТЕМ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

*Выполнен анализ методов, моделей и алгоритмов, которые могут быть положены в основу компьютеризации интегрированной логистической поддержки трубопроводных систем нефтехимических предприятий. По результатам анализа сформулировано шесть условных направлений, к которым можно отнести рассмотренные методы, модели и алгоритмы: гидравлические и тепловые процессы; оптимизация расположения трубопроводных трасс; промышленная безопасность и эффективность функционирования; расчет прочностных характеристик; информационная поддержка, использование баз данных и информационных технологий; техническое обслуживание и ремонт. Отмечено, что в научно-технической литературе имеется большое количество научных трудов по решению отдельных и комплексных задач интегрированной логистической поддержки жизненного цикла различного технического оборудования, включая трубопроводы. Показано, что представленные в научно-технической литературе модели и алгоритмы имеют особую научную и практическую значимость, но позволяют решать только отдельные задачи интегрированной логистической поддержки трубопроводных систем. Отмечено, что это обусловлено многообразием и сложностью задач, а также разобщенностью исследователей и разработчиков программного обеспечения. В результате выполненного анализа не удалось выявить модели и алгоритмы, которые позволяют решать следующие важные задачи интегрированной логистической поддержки трубопроводных систем: определение характеристик классификации трубопроводов; выбор и расчет характеристик конструктивных элементов и соединений трубопроводов; расчет характеристик технических устройств для снижения энергии колебаний давления в трубопроводных системах поршневых компрессорных агрегатов; автоматическое формирование перечня трубопроводов по всему предпри-*

ятию и многие другие задачи технического обслуживания и ремонта трубопроводных систем.

**Ключевые слова:** интегрированная логистическая поддержка, жизненный цикл, трубопроводные системы, компьютерные модели, модели представления знаний.

**E.R. Moshev, G.S. Myrzin**

LLC «UralPromBezopasnost», Perm, Russian Federation

**V.D. Belov, G.A. Ustinov**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

## **ANALYSIS OF METHODS, MODELS AND ALGORITHMS OF COMPUTERIZATION OF INTEGRATED LOGISTIC SUPPORT OF PROCESS PIPELINES OF PETROCHEMICAL PLANTS**

*In this paper, the analysis of methods, models and algorithms, which can be put in the basis of computerization of integrated logistic support of pipeline systems of petrochemical plants, is carried out. By the results of the analysis, six conditional directions, which one can include the considered methods, models and algorithms, are formulated: hydraulic and thermal processes; optimization of the location of pipeline routes; industrial safety and operational efficiency; calculation of strength characteristics; information support, use of databases and information technologies; maintenance and repair. It is noted that there is a large number of scientific papers on solving individual and complex tasks of integrated logistic support of various technical equipment life cycle, including pipelines, in the scientific and technical literature. It is shown that models and algorithms presented in the science and technical literature have high scientific and practical significance, but allow solving only individual tasks of integrated logistic support of pipeline systems. It is noted that this is due to the diversity and complexity of the tasks, as well as the disunity of researchers and software developers. It is also shown that as a result of the performed analysis it was not possible to identify models and algorithms to solve following important tasks of integrated logistic support of pipeline systems: definition of characteristics of the pipelines classification; selection and calculation of characteristics of pipelines structural elements and connections; calculation of the characteristics of technical devices to reduce the energy of pressure fluctuations in the pipeline systems of reciprocating compressor units; automatic generation of a list of pipelines throughout the plant and many other tasks for maintenance and repair of pipeline systems.*

**Keywords:** integrated logistics support, life cycle, pipeline system, computer models, model of knowledge representation.

Под интегрированной логистической поддержкой (ИЛП) в статье понимается совокупность видов инженерной деятельности, реализуемых посредством управленческих, инженерных и информационных технологий, которые обеспечивают высокий уровень готовности промышленных трубопроводов (в том числе показателей, определяющих готовность: безотказности, долговечности, ремонтпригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности и др.) при одновременном снижении затрат на их эксплуатацию<sup>1</sup>.

При анализе методов, моделей и алгоритмов как основы компьютеризации интегрированной логистической поддержки в первую очередь рассматривались источники научно-технической литературы, посвященные трубопроводам и трубопроводным системам. Но при этом учитывались и те источники, где содержались методологические подходы, а также модели и алгоритмы, которые были полезны для разработки основ ИЛП трубопроводных систем нефтехимических предприятий (НХП).

Выявленные в научно-технической литературе методы, модели и алгоритмы, относящиеся к трубопроводам, можно отнести к шести условным направлениям:

- 1) гидравлические и тепловые процессы;
- 2) оптимизация расположения трубопроводных трасс;
- 3) промышленная безопасность и эффективность функционирования;
- 4) расчет прочностных характеристик;
- 5) информационная поддержка, использование баз данных и информационных технологий;
- 6) техническое обслуживание и ремонт.

С точки зрения ИЛП жизненного цикла (ЖЦ) наиболее системно и фундаментально промышленные трубопроводные системы (ТС) рассмотрены в источниках [1–7]. В работе [2] дана методика автоматизированного проектирования и расчета трубопроводов, предложены алгоритмы и программное обеспечение расчета сложных трубопроводных систем с использованием топологических моделей в виде структурных графов. Описаны эвристическо-эволюционные алгоритмы разработки оптимальной структуры систем технологических трубопроводов. Приведены: методология построения оптимальной топо-

---

<sup>1</sup> ГОСТ Р 53394–2009. Интегрированная логистическая поддержка. Основные термины и определения. Введ. 14.09.09. М.: Стандартинформ, 2010. 23 с.

логии ТС с точки зрения решения гидравлических задач; способ, с помощью которого может быть осуществлена автоматизация выбора характеристик элементов трубопровода как функции параметров рабочей среды и характеристик классификации трубопровода; прочностные расчеты и расчеты теплоизоляции; алгоритмы расчета топологических моделей трубопроводов в виде структурных графов; расчеты гидравлических цепей, анализ надежности ТС.

Для разработки моделей и алгоритмов, обеспечивающих интеллектуальную поддержку процедур принятия решений по ИЛП, большой интерес представляет монография [8]. В данном источнике ТС не рассмотрены, но приведены виды моделей представления знаний, которые хорошо подходят для описания трубопроводных систем НХП.

В монографии [9] на достаточно глубоком и фундаментальном уровне рассмотрены методики прогнозирования и оценки долговечности элементов различных типов трубопроводов при различных видах нагружения. Даны математические описания стохастических процессов нагружения конструкции трубопроводных систем при монтаже и эксплуатации. Полученные автором результаты, безусловно, вносят существенный научный вклад в развитие теории прочности и надежности трубопроводных систем, но, к сожалению, сложно применимы для практического решения поставленных задач ИЛП.

В работах других авторов представлены преимущественно частные решения отдельных задач ИЛП трубопроводов, трубопроводных систем и других технических систем и объектов. Эти решения целесообразно использовать на более позднем этапе разработки проблемно-ориентированной системы ИЛП жизненного цикла трубопроводных систем НХП. В работе [10] предложены трехмерные компьютерные модели и математические алгоритмы анализа нестационарных турбулентных течений с помощью интегральных индексов. Разработаны архитектура и программно-информационное обеспечение компьютерно-информационной системы моделирования нестационарных турбулентных течений несжимаемых газов. Исследовано влияние пульсаций потока на вибрацию трубопроводов, но не предложены способы снижения ее разрушающего воздействия. Результаты работы имеют важное значение для ИЛП трубопроводов с газожидкостной рабочей средой и могут быть в будущем использованы при детализации проблемно-ориентированной системы интегрированной логистической поддержки трубопроводных систем НХП.

В источнике [11] рассмотрены задачи расчета установившихся газо-, парожидкостных течений в трубопроводах произвольной конфигурации. Предложены математические модели установившегося течения двухфазных газожидкостных потоков в промышленных трубопроводах. Разработаны и реализованы алгоритмы прямого и обратного расчета неразветвленных частей трубопровода.

Автором [12] разработаны компьютерные модели представления знаний в области компоновки химических производств, отображающих монтажно-технологические, физико-химические и гидродинамические ограничения. Даны: декомпозиционно-эвристический алгоритм оптимального размещения единицы оборудования, позволяющий получать оптимальные решения по назначению месторасположения единицы оборудования, обеспечивающие минимум приведенных затрат; редуцированный топологическо-эвристический алгоритм оптимальной трассировки разветвленных сетей технологических трубопроводов с использованием метаэвристики муравьиных колоний, осуществляющий поиск конфигурации трасс технологических трубопроводов на топологической модели пространства в виде редуцированного обобщенного гипотетического конструкционного графа нерегулярной структуры.

В работе [13] представлены иерархические нечеткие многокритериальные муравьиные алгоритмы для двухкритериального выбора оптимального маршрута прокладки телекоммуникационной сети – задача, аналогичная выбору оптимального маршрута трубопроводов.

В монографии [14] изложены научная концепция, вычислительные технологии и методы численного моделирования, предназначенные для решения проблем повышения безопасности и эффективности функционирования магистральных трубопроводных систем с использованием современных достижений вычислительной механики и математической оптимизации.

В работе [15] разработана методика моделирования поведения толстостенного трубопровода в условиях неоднородного и изменяющегося во времени теплового поля, а также воздействия изменяющегося давления водорода. Разработана методика идентификации построенных моделей по имеющимся экспериментальным данным.

В источнике [16] рассмотрены модели, методы анализа и оценки риска и последствий аварий на производствах химической промышленности. Поставленные авторами вопросы важны для ИПП, но относятся к производству в целом и не рассматривают трубопроводы отдельно.

Автором [17] разработаны следующие методики: прогнозирования безопасности трубопроводов на основе статистической обработки диагностической информации с моделированием их изменения в процессе дальнейшей эксплуатации и с использованием нестандартных функций распределения случайных чисел; расчетного определения напряженного состояния сложных участков трубопровода, использующая в качестве исходной информации результаты обследования их планово-высотного положения и параметры силового воздействия на трубопровод.

О моделировании коррозионных процессов и информационной системе поддержки принятия решений в задачах защиты нефтепромысловых трубопроводов говорится в источнике [18], здесь приводится математическая модель расчета скоростей коррозии углеродистых сталей в нефтепромысловых водных средах с учетом физико-химических свойств рабочей среды и технологических параметров процесса. Модель позволяет повысить точность прогнозирования скорости коррозии. Разработаны рекомендации по структуре баз данных для рабочих сред с учетом информации по объектам и ингибиторам коррозии. С помощью предложенных моделей разработаны алгоритмы функционирования программной системы поддержки принятия решений в задачах коррозионной защиты нефтепромысловых трубопроводов, а также расчета скорости коррозии и выбора рационального ингибитора.

В статье [19] рассмотрен процесс разработки паспорта безопасности опасного производственного объекта. Разработана функциональная модель системы информационной поддержки создания паспорта безопасности. Даны примеры информационной поддержки на различных этапах процесса. Для поддержки принятия решений при идентификации опасных точек объекта и выделении сценариев развития возможных аварий предложено использовать базы знаний.

Авторы [20] приводят результат использования информационных моделей трубопроводов при разработке комплекса программ для анализа и оценки рисков магистральных трубопроводов Slider Office. Приведена структурная схема данного комплекса программ. Специфика трубопроводов НХП в статье не учтена.

В источниках [21, 22] решаются задачи оптимального управления магистральными трубопроводными сетями с точки зрения предотвращения и расследования аварийных ситуаций. Решение задач «базируется на численном восстановлении пространственно-временных распреде-

лений параметров неизотермических неустановившихся течений транспортируемых газовых смесей по результатам натуральных измерений в существенно ограниченном количестве локальных областей, отстоящих друг от друга на значительных расстояниях по длине газопроводов».

Авторы [23] рассмотрели актуальный для корпоративных комплексов программ алгоритм использования электронной цифровой подписи, которой можно подписывать и записи в базу данных. Ими также предложена концептуальная модель продвижения наукоемкой продукции на базе ИПИ-технологий (аналог CALS-технологий), в соответствии с которыми выполнена постановка научных и прикладных задач совершенствования методов и моделей интегрированной логистической поддержки сложных наукоемких изделий.

В работе [24] разработаны математическая модель и алгоритм принятия решений по обоснованию приоритетов вывода в ремонт участков линейной части магистральных газопроводов, использующий информационную модель участков и обработанных экспертных оценок риска. Разработаны концептуальная и функциональная модели системы поддержки принятия решений при определении очередности вывода участков линейной части магистральных газопроводов в ремонт.

В источнике [25] рассмотрены математические модели, связанные с транспортированием нефтепродуктов по трубопроводам. Здесь для решения гидравлических задач использованы модели конструктивных элементов трубопровода в виде кусочно-линейных агрегатов; приводят имитационную модель перекачиваемых нефтепродуктов. Также рассмотрены модели режимов перекачивания изотермических и неизотермических нефтепродуктов и дана методика проведения соответствующих расчетов.

В монографии [26] приведен алгоритм поверочного прочностного расчета разветвленных пространственных трубопроводов. Рассмотрены методы расчета трубопроводов с односторонними опорами, дан алгоритм расчета данных трубопроводов, а также алгоритм затяжки пружинных опор.

В источнике [27] рассмотрены математические модели магистральных трубопроводов и задачи их технического обслуживания. Представлены модели прогнозирования надежности, анализа вибрационных процессов, технического обслуживания и ремонта с использованием результатов прогнозирования технического состояния. Приведены технология и алгоритмы решения задач планирования, учета и анализа процессов технического обслуживания и управления ремонтами.

Авторами [28] показано использование компьютерных технологий при проектировании магистральных трубопроводов, а также при подготовке диспетчерского персонала. Дана объектно-ориентированная технология информационно-алгоритмического представления газотранспортных систем.

В источниках [28, 29] выполнен обзор моделей и методов, позволяющих рассчитать как стационарные, так и нестационарные режимы течения транспортируемых сред в магистральных трубопроводах.

В работе [30] с помощью метода анализа иерархий рассмотрены задачи планирования технического обслуживания и ремонта магистральных трубопроводов. Здесь же приведены средства и модели поддержки решений, принимаемых при планировании капитального ремонта. Представлена методология разработки графической информационной системы, назначением которой является анализ технического состояния объектов газоснабжения.

Автором [31] рассмотрены идентификационные и прогнозные модели, а также алгоритм оценки технического состояния трубопроводов, транспортирующих сероводородсодержащие среды.

В источнике [32] рассмотрены математические методы и алгоритмы, описаны программные модули, предназначенные для поиска в магистральных трубопроводах оптимальных неустановившихся режимов течения перемещаемой газообразной среды. Автором также предложен комплекс программ для анализа и синтеза распределенных трубопроводных систем. Даны рекомендации использования комплекса программ при решении задач проектирования, а также реконструкции и эксплуатации магистральных трубопроводов.

В работе [33] предложена интегрированная информационно-управляющая система газовых промыслов, разработанная с помощью формализованного описания различных объектов, включая трубопроводы, и представляющая собой единую модель газового комплекса.

Важные с точки зрения ИПП трубопроводных систем вопросы рассмотрены в работе [34], где дано теоретико-множественное описание модели трубопровода, представленной в виде последовательности технических состояний, регистрируемых в дискретные моменты времени. С помощью полученной модели автором решен ряд практических задач: определение давления и весовых нагрузок, при которых трубопровод переходит в предельное состояние; прогнозирование технического состояния трубопровода по результатам замеров толщины стенки; проверка,

с помощью теории предикатов, соответствия некоторых технологических и конструктивных параметров трубопровода требованиям нормативно-технической документации; управление ремонтами трубопровода с точки зрения минимизации затрат на замену конструкционных элементов при условии обеспечения заданной величины межремонтного пробега трубопровода. Дано использование метода ветвей и границ в задачах выбора оптимальной замены изношенных участков трубопроводов.

Фундаментально и широко рассмотрены вопросы логистического подхода к управлению материально-техническими запасами промышленных предприятий и жизненным циклом продукции в работах [35, 36], где утверждается необходимость использования логистики в вопросах управления материально-техническим снабжением.

В работах [37–41] рассмотрены вопросы: разработки динамических моделей системы интегрированной логистической поддержки наукоемкой продукции на стадии эксплуатации как сложного кибернетического объекта и потоковых процессов промышленного предприятия; ИЛП жизненного цикла наукоемкой продукции; интеграции участников и процессов жизненного цикла наукоемкой продукции в систему логистической поддержки. Предлагается автоматизировать связанные ЖЦ процессы путем внедрения мультиагентов – программных агентов, которые реализованы и функционируют как самостоятельная специализированная компьютерная программа или элемент искусственного интеллекта [42].

В работах [28, 43–47] представлены модели течений газа и нефти в трубопроводных системах; модели расчета и оптимизации решений при проектировании трубопроводов. Изложен системный подход к выбору рационального варианта, проектируемого магистрального газопровода на многокритериальной основе. Описаны системные факторы, аспекты системности и процедура применения экспертного логического анализа для принятия обоснованных решений при развитии и реконструкции магистральных газопроводов. Разработана концепция создания многофункционального программно-вычислительного комплекса для формирования программ развития и реконструкции систем газоснабжения на единой методической и информационной базе. Указаны актуальные проблемы надежности систем газоснабжения, приведена характеристика разработанных для их решения моделей.

На основании приведенного выше анализа можно сделать следующие выводы. В научно-технической литературе имеется большое количе-

ство трудов по решению отдельных и комплексных задач ИЛП жизненного цикла различного технического оборудования, включая трубопроводы. В указанных научных работах изложены методы логистики ресурсосбережения в нефтегазохимическом и топливно-энергетическом комплексах, основы ИЛП авиационной и морской техники, а также систем вооружения; для ТС предложены эвристические алгоритмы разработки их оптимальной структуры; представлены алгоритмы конструкционно-тепловых расчетов, анализа надежности и гидравлических режимов ТС; предложены декомпозиционно-эвристические алгоритмы оптимальной ресурсоэнергоэффективной компоновки химических производств с учетом технологических особенностей и требований промышленной безопасности, а также топологическо-эвристические алгоритмы оптимальной трассировки разветвленных ТС с использованием метаэвристики муравьиных колоний; рассмотрены модели и алгоритмы расчета гидравлических, теплотехнических и конструкционных характеристик ТС.

Представленные в научно-технической литературе модели и алгоритмы имеют большую научную и практическую значимость, но позволяют решать только отдельные задачи ИЛП трубопроводных систем, что обусловлено многообразием и сложностью этих задач, а также разобщенностью исследователей и разработчиков программного обеспечения.

Одновременно с этим проделанный анализ научных работ по ИЛП трубопроводных систем не выявил моделей и алгоритмов, позволяющих решать следующие важные задачи: определение характеристик классификации трубопроводов; выбор и расчет характеристик конструкционных элементов и соединений трубопроводов; расчет характеристик технических устройств для снижения энергии колебаний давления в ТС поршневых компрессорных агрегатов; автоматическое формирование перечня трубопроводов по всему предприятию и многие другие задачи технического обслуживания и ремонта ТС.

### **Список литературы**

1. Кафаров В.В., Богомолов Б.Б., Мешалкин В.П. Эвристическо-декомпозиционный алгоритм оптимальной трассировки трубопроводов химико-технологических систем // ДАН СССР. – 1986. – Т. 290, № 2. – С. 410–414.
2. Кафаров В.В., Мешалкин В. П. Проектирование и расчет оптимальных систем технологических трубопроводов. – М.: Химия, 1991. – 362 с.

3. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Финкельштейн Б.И. Эвристический маршрутно-реверсный алгоритм оптимальной трассировки трубопроводов ХТС // Теоретические основы химической технологии. – 1991. – Т. 25, № 3. – С. 416–423.

4. Техничко-экономический расчет капитальных затрат на трубопроводы химических и нефтехимических производств / В.В. Кафаров, В.Л. Перов, В.В. Асташкин, Н.М. Чугунова, В.П. Мешалкин // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1975. – № 5. – С. 34–35.

5. Мешалкин В.П., Шубин И.А. Продукционная модель оптимальной трассировки систем технологических трубопроводов // Математические методы в химии (ММХ-6-89): материалы IV Всесоюз. конф. – Новочеркасск, 1989. – С. 124–125.

6. Никольский В.Э., Сельский Б.Е. Мешалкин В.П. Анализ эффективности аппроксимационно-топологических методов расчета сложных трубопроводных систем // Математические методы в химии и химической технологии (ММХ-10): сб. тезисов школы молодых ученых при междунар. конф. – Тула, 1996. – С. 24–25.

7. Панов М.Я., Квасов И.С., Мешалкин В.П. Композиционно-топологический метод моделирования потокораспределения в задачах реконструкции гидравлических трубопроводных систем химических производств // Методы кибернетики ХТП (КХТП-IV-94): тез. докл. IV Междунар. науч. конф. – М.: Изд-во РХТУ, 1994. – С. 87.

8. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии. Основы теории, опыт разработки и применения. – М.: Химия, 1995. – 368 с.

9. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов: теория, методы расчета, проектирование. – М.: Недра, 1992. – 271 с.

10. Булкатов А.Н. Трехмерное компьютерное моделирование и алгоритмы анализа нестационарных газовых течений в сложных технологических трубопроводах кругового сечения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2002. – 18 с.

11. Бабенко А.В., Корельштейн Л.Б., Гартман Т.Н. Математическое моделирование установившегося течения двухфазных газожидкостных потоков в промышленных трубопроводах. Расчет ветвей // Химическая технология. – 2012. – № 7. – С. 429–440.

12. Образцов А.А. Топологические декомпозиционно-эвристические алгоритмы и комплекс программ оптимальной ресурсоэнергоэф-

фективной компоновки химических производств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Смоленск, 2009. – 19 с.

13. Глушко С.И. Иерархические нечеткие мультиколониальные муравьиные алгоритмы и комплекс программ оптимизации структуры телекоммуникационной сети нефтетранспортного предприятия: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 18 с.

14. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Макс Пресс, 2009. – 436 с.

15. Бубнов А.А. Моделирование напряженного состояния трубопроводов, подвергающихся высокотемпературной водородной коррозии в неоднородном поле температур: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Саратов, 2007. – 20 с.

16. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В. Управление безопасностью химических производств на основе новых информационных технологий. – М.: Химия, КолосС, 2004. – 416 с.

17. Гумеров И.К. Методология экспертизы безопасности длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов на основе математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2006. – 156 с.

18. Углова Е.С. Моделирование коррозионных процессов для информационной системы поддержки принятия решений в задачах защиты нефтепромысловых трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2010. – 147 с.

19. Юсупова Н.И., Митакович С.А., Еникеева К.Р. Системное моделирование процесса информационной поддержки разработки паспортов безопасности опасных производственных объектов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2008. – Т. 10, № 2. – С. 80–87.

20. Машкин И.Р., Нашубский В.А. Опыт создания системы оценки рисков на основе информационной модели трубопровода // ГИС обозрение. – 2000. – № 1. – С. 46–49.

21. Селезнев В.Е. Об одном численном методе восстановления транспортных потоков в газопроводных сетях // Математическое моделирование. – 2013. – Т. 25, № 1. – С. 77–98.

22. Селезнев В.Е. Повышение безопасности и эффективности газопроводных систем ТЭК с использованием методов прямого численного моделирования: дис. ... д-ра техн. наук. – Саратов, 2003. – 303 с.

23. Судов Е.В., Левин А.И. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России / НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика». – М.: 2002. – 131 с.

24. Воеводин И.Г. Информационная поддержка принятия управленческих решений в системе планирования производства ремонтных работ на газопроводах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Астрахань, 2010. – 24 с.

25. Зверева Т.В., Челинцев С.Н., Яковлев Е.И. Моделирование трубопроводного транспорта нефтехимических производств. – М.: Химия, 1987. – 176 с.

26. Магалиф В.Я., Якобсон Л.С. Расчеты трубопроводов на вычислительных машинах. – М.: Энергия, 1969. – 297 с.

27. Моделирование задач эксплуатации систем трубопроводного транспорта / Е. И. Яковлев [и др.]. – М.: ВНИИОЭНГ, 1992. – 359 с.

28. Атавин А.А., Карасевич А.М., Сухарев М.Г. Трубопроводные системы энергетики: модели, приложения, информационные технологии. – М.: Нефть и газ, 2000. – 320 с.

29. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. – М.: Нефть и газ, 2003. – 335 с.

30. Лим В.Г. Разработка автоматизированной системы принятия решений в задачах управления техническим надзором за развитием систем магистрального газопроводного транспорта: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2000. – 24 с.

31. Щепинов Д.Н. Автоматизация диагностирования трубопроводов, транспортирующих сероводородсодержащие среды: дис. ... канд. техн. наук. – Оренбург, 1998. – 212 с.

32. Самойлов Р.В. Математическое и программное обеспечение задач оптимального управления функционированием и развитием газопроводных сетей и систем: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2005. – 210 с.

33. Лыков А.Г. Интегрированная информационно-управляющая система газовых промыслов предприятий Крайнего Севера: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2003. – 246 с.

34. Мырзин Г.С. Автоматизированное управление процессом технического обслуживания системы технологических трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2008. – 139 с.

35. Инженерная логистика. Логистически-ориентированное управление жизненным циклом продукции / Л.Б. Миротин [и др.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 644 с.

36. Промышленная логистика: конспект лекций / под ред. А.А. Колобова. – М.: МИПК при МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. – 38 с.

37. Бром А.Е. Динамическая модель потоковых процессов промышленного предприятия // *Технология машиностроения*. – 2007. – № 12. – С. 70–77.

38. Бром А.Е. Об интегрированной логистической поддержке жизненного цикла наукоемкой продукции // *Логистика*. – 2008. – № 1. – С. 16–20.

39. Бром А.Е. Разработка концепции и методологических основ создания организационной системы логистической поддержки жизненного цикла наукоемкой продукции: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2009. – 318 с.

40. Бром А.Е., Александров А.А. Разработка экономико-математической модели интеграции участников и процессов жизненного цикла наукоемкой продукции в систему логистической поддержки // *Известия вузов. Машиностроение*. – 2008. – № 3. – С. 73–92.

41. Бром А.Е., Шутеев В.А. Основы и перспективы применения информационных интеллектуальных систем для процессов жизненного цикла наукоемких изделий // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. История. Политология. Экономика. Информатика*. – 2009. – Т. 12, № 15-1. – С. 144–150.

42. Лекция. Мультиагентные технологии [Электронный ресурс] // *НОУ ИНТУИТ [сайт]*. [2003–2014]. – URL: <http://www.intuit.ru/> (дата обращения: 01.01.2013).

43. Сухарев М.Г. Инновационная компьютерная технология: оптимизация режимов газотранспортных систем // *Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем: тр. XII Всерос. науч. сем. с международным участием*. – М., 2010. – С. 40–47.

44. Сухарев М.Г. Информационные технологии в транспорте и распределении природного газа // *Газовая промышленность*. – 2010. – № 13. – С. 84–88.

45. Сухарев М.Г., Карасевич А.М. Модели надежности газоснабжающих систем // *Автоматика и телемеханика*. – 2010. – № 7. – С. 149–159.

46. Сухарев М.Г., Карасевич А.М. Технологический расчет и обеспечение надежности газо- и нефтепроводов. – М.: Нефть и газ, 2000. – 272 с.

47. Сухарев М.Г., Шелекета В.С. Системный подход к принятию решений по развитию и реконструкции региональных газотранспортных систем // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2010. – № 1. – С. 58–66.

### References

1. Kafarov V.V., Bogomolov B.B., Meshalkin V. P. Evristicheskodekompozitsionnyi algoritm optimal'noi trassirovki truboprovodov khimiko-tekhnologicheskikh sistem [Heuristic-decomposition algorithm for optimal pipeline tracing of chemical-technological systems]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1986, vol. 290, no. 2, pp. 410-414.

2. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Proektirovanie i raschet optimal'nykh sistem tekhnologicheskikh truboprovodov [Engineering and calculation of optimal systems of technological pipelines]. Moscow, Himiya, 1991, 362 p.

3. Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Finkel'shtein B.I. Evristicheskiy marshrutno-reversnyi algoritm optimal'noi trassirovki truboprovodov KhTS [Heuristic routing-reverse algorithm for optimal pipeline tracing]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*, 1991, vol. 25, no. 3, pp. 416-423.

4. Kafarov V.V., Perov V.L., Astashkin V.V. et al. Tekhniko-ekonomicheskii raschet kapital'nykh zatrat na truboprovody khimicheskikh i neftekhi-micheskikh proizvodstv [Technical and economic calculation of capital costs for pipelines of chemical and petrochemical industries]. *Khimicheskoe i neftianoe mashinostroenie*, 1975, no. 5, pp. 34-35.

5. Meshalkin V.P., Shubin I. A. Produktsionnaia model' optimal'noi trassirovki si-stem tekhnologicheskikh truboprovodov [Production model of optimal tracing of technological piping systems]. *IV Vserossiiskaia konferentsiia «Matematicheskie metody v himii» (MMH-6-89)*. Novocherkassk, 1989, pp. 124-125.

6. Nikol'skii V.E., Sel'skii B.E., Meshalkin V.P. Analiz effektivnosti approksimatsionno-topologicheskikh metodov rascheta slozhnykh truboprovodnykh sistem [Analysis of the efficiency of approximation-topological methods for calculating complex pipeline systems]. *Sbornik tezisov shkoly molodykh uchenykh pri mezhdunarodnoi konferentsii «Matematicheskie metody v khimii i khimicheskoi tekhnologii (MMKh-10)»*. Tula, 1996, pp. 24-25.

7. Panov M.Ia., Kvasov I.S., Meshalkin V.P. Kompozitsionno-topologicheskii metod modelirovaniia potokoraspredeleniia v zadachakh

rekonstruktsii gidravlicheskiykh truboprovodnykh sistem khimicheskikh proizvodstv [Compositional-topological method for modeling flow distribution in problems of reconstruction of hydraulic pipelines of chemical production] *Abstracts of Papers of the 4th International Scientific Conference "Methods of Cybernetics of HTP (KHTP-IV-94)*. Moscow, University of Chemical Technology of Russia, 1994, 87 p.

8. Meshalkin V.P. Ekspertnye sistemy v khimicheskoi tekhnologii. Osnovy teorii, opyt razrabotki i primeneniia [Expert systems in chemical technology. Fundamentals of theory, experience in development and application]. Moscow, Khimiia, 1995, 368 p.

9. Zavoichinskii B.I. Dolgovechnost' magistral'nykh i tekhnologicheskikh truboprovodov: teoriia, metody rascheta, proektirovanie [Durability of the main and technological pipelines: theory, methods of calculation, engineering]. Moscow, NEDRA, 1992, 271 p.

10. Bulkatov A.N. Trekhmernoe komp'iuternoe modelirovanie i algoritmy analiza nesta-tsionarnykh gazovykh techenii v slozhnykh tekhnologicheskikh truboprovodakh krugovogo secheniia [Three-dimensional computer modeling and algorithms for analysis of non-stationary gas flows in complex technological pipelines of circular cross-section]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2002, 18 p.

11. Babenko A.V., Korel'shtein L.B., Gartman T.N. Matematicheskoe modelirovanie ustanovivshegosia techeniia dvukhfaznykh gazozhidkostnykh potokov v promyshlennykh truboprovodakh. Raschet vetvei [Mathematical modeling of the steady flow of two-phase gas-liquid flows in industrial pipelines. Calculation of branches]. *Chemical Technology*. 2012, no. 7, pp. 429-440.

12. Obraztsov A.A. Topologicheskie dekompozitsionno-evristicheskie algoritmy i kompleks programm optimal'noi resursoenergoeffektivnoi komponovki khimicheskikh proizvodstv [Topological decomposition-heuristic algorithms and a complex of programs of the optimal resource-energy-efficient arrangement of chemical industries] Abstract of Ph. D. thesis. Smolensk, 2009, 19 p.

13. Glushko S.I. Ierarkhicheskie nechetkie mul'tikolonial'nye murav'inye algoritmy i kompleks programm optimizatsii struktury telekommunikatsionnoi seti neftransportnogo predpriiatiia [Hierarchical fuzzy multicolonial ant algorithms and a set of programs to optimize the structure of the telecommunications network of the oil transport enterprise] Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2013, 18 p.

14. Seleznev V.E., Aleshin V.V., Prialov S.N. Osnovy chislennogo modelirovaniia magistral'nykh truboprovodov [Fundamentals of numerical simulation of main pipelines]. Moscow, Maks Press, 2009, 436 p.

15. Bubnov A.A. Modelirovanie napriazhennogo sostoianiia truboprovodov, podvergaiushchikhsia vysokotemperaturnoi vodorodnoi korrozii v neodnorodnom pole temperatur [Modeling the stress state of pipelines subjected to high-temperature hydrogen corrosion in an inhomogeneous temperature field]. Abstract of Ph. D. thesis. Saratov, 2007, 20 p.

16. Egorov A.F., Savitskaia T.V. Upravlenie bezopasnost'iu khimicheskikh proizvodstv na osnove novykh informatsionnykh tekhnologii [Control of the safety of chemical industries based on new information technologies]. Moscow, Himiya KolosS, 2004, 416 p.

17. Gumerov I.K. Metodologiiia ekspertizy bezopasnosti dlitel'no ekspluatiruemykh magistral'nykh truboprovodov na osnove matematicheskogo modelirovaniia [Methodology of safety expertise of long-term main pipelines based on mathematical modeling]. Ph. D. thesis. Ufa, 2006, 156 p.

18. Uglova E.S. Modelirovanie korrozionnykh protsessov dlia informatsionnoi sistemy podderzhki priniatia reshenii v zadachakh zashchity neftepromyslovykh truboprovodov [Modeling of corrosion processes for the information support system for decision-making in the tasks of protecting oilfield pipelines]. Ph. D. thesis. Moscow, 2010, 147 p.

19. Iusupova N.I., Mitakovich S.A., Enikeeva K.R. Sistemnoe modelirovanie protsessa informatsionnoi podderzhki razrabotki pasportov bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov [System modeling of the process of information support for the development of safety data sheets for hazardous production facilities]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, vol. 10, no. 2, pp. 80-87.

20. Makhkin I.R., Nashchubskii V.A. Opyt sozdaniia sistemy otsenki riskov na osnove informatsionnoi modeli truboprovoda [Experience in creating a risk assessment system based on the information model of the pipeline]. *GIS obozrenie*, 2000, no. 1, pp. 46-49.

21. Seleznev V.E. Ob odnom chislennom metode vosstanovleniia transportnykh potokov v gazoprovodnykh setiakh [About one numerical method of restoration of transport streams in gas mains]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2013, vol. 25, no. 1, pp. 77-98.

22. Seleznev V.E. Povyshenie bezopasnosti i effektivnosti gazoprovodnykh sistem TEK s ispol'zovaniem metodov priamogo chislennogo modelirovaniia [Increase of safety and efficiency of gas-supply

systems of the fuel and energy complex with the use of direct numerical simulation methods]. Ph. D. thesis. Saratov, 2003, 303 p.

23. Sudov E.V., Levin A.I. Kontseptsiiia razvitiia CALS-tekhnologii v promyshlennosti Rossii [The concept of development of CALS-technologies in the Russian industry]. *NIC CALS-tekhnologij «Prikladnaya logistika»*, Moscow, 2002, 131 p.

24. Voevodin I.G. Informatsionnaia podderzhka priniatii upravlencheskikh reshenii v sisteme planirovaniia proizvodstva remontnykh rabot na gazoprovodakh [Informational support for management decisions in the planning system for repair work on gas pipelines]. Abstract of Ph. D. thesis. Astrahan', 2010, 24 p.

25. Zvereva T.V., Chelintsev S.N., Iakovlev E.I. Modelirovanie truboprovodnogo transporta neftekhimicheskikh proizvodstv [Modeling of pipeline transport of petrochemical industries]. Moscow, Himiya, 1987, 176 p.

26. Magalif V.Ia., Iakobson L.S. Raschety truboprovodov na vychislitel'nykh mashinakh [Calculations of pipelines on computers]. Moscow, Energiia, 1969, 297 p.

27. Iakovlev E.I. Modelirovanie zadach ekspluatatsii sistem truboprovodnogo transporta [Modeling of tasks of operation of pipeline transport systems]. Moscow, VNIIOEHNG, 1992, 359 p.

28. Atavin A.A., Karasevich A.M., Sukharev M.G. Truboprovodnye sistemy energetiki: modeli, prilozheniia, informatsionnye tekhnologii. [Pipeline energy systems: models, applications, information technologies]. Moscow, Neft' i gaz, 2000, 320 p.

29. Lur'e M.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessov truboprovodnogo transporta nefti, nefteproduktov i gaza [Mathematical modeling of pipeline transportation of oil, oil products and gas]. Moscow, Neft' i gaz, 2003, 335 p.

30. Lim V.G. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy priniatii reshenii v zadachakh upravleniia tekhnicheskim nadzorom za razvitiem sistem magistral'nogo gazoprovodnogo transporta [Development of an automated decision-making system in the tasks of managing technical supervision over the development of trunk gas transportation systems]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2000, 24 p.

31. Shchepinov D.N. Avtomatizatsiia diagnostirovaniia truboprovodov, transportiruiushchikh serovodorodsoderzhashchie sredy [Automation of diagnostics of pipelines transporting hydrogen sulphide-containing media]. Ph. D. thesis. Orenburg, 1998, 212 p.

32. Samoilov R.V. Matematicheskoe i programmnoe obespechenie zadach optimal'nogo upravleniia funktsionirovaniem i razvitiem gazoprovodnykh setei i sistem [Mathematical and software support of optimal control tasks for the functioning and development of gas transmission networks and systems]. Ph. D. thesis. Moscow, 2005, 210 p.

33. Lykov A.G. Integrirovannaia informatsionno-upravliaiushchaia sistema gazovykh promyslov predpriatii krainego severa [Integrated information and control system of gas fields of enterprises of the Far North]. Ph. D. thesis. Moscow, 2003, 246 p.

34. Myrzin G.S. Avtomatizirovannoe upravlenie protsessom tekhnicheskogo obsluzhivaniia sistemy tekhnologicheskikh truboprovodov [Automated control over the process of technical maintenance of the system of technological pipelines] Ph. D. thesis. Perm', 2008, 139 p.

35. Mirotin L.B. et al. Inzhenernaia logistika. Logisticheskii-orientirovannoe upravlenie zhiznennym tsiklom produktsii [Engineering logistics. Logistically oriented product life cycle management]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2013, 644 p.

36. Promyshlennaia logistika [Industrial logistics]. *Konspekt lektsii*. Ed. A.A. Kolobova. Moscow, MIPK pri MGTU im. N. E. Baumana, 1993, 38 p.

37. Brom A.E. Dinamicheskaiia model' potokovykh protsessov promyshlennogo predpriatiia [Dynamic model of stream processes of an industrial enterprise]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2007, no. 12, pp. 70-77.

38. Brom A.E. Ob integrirovannoi logisticheskoi podderzhke zhiznennogo tsikla naukoemkoi produktsii [On Integrated Logistics Support for the Life Cycle of High-Tech Products]. *Logistika*, 2008, no. 1, pp. 16-20.

39. Brom A.E. Razrabotka kontseptsii i metodologicheskikh osnov sozdaniia organizatsionnoi sistemy logisticheskoi podderzhki zhiznennogo tsikla naukoemkoi produktsii [Development of the concept and methodological foundations for the creation of an organizational system for logistic support of the life cycle of high technology products]. Moscow, 2009, 318 p.

40. Brom A.E. Aleksandrov A.A. Razrabotka ekonomiko-matematicheskoi modeli integratsii uchastnikov i protsessov zhiznennogo tsikla naukoemkoi produktsii v sistemu logisticheskoi podderzhki [Development of the economic-mathematical model of integration of participants and processes of the life cycle of science-intensive products into the system of logistical support]. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie*. 2008, no. 3, pp. 73-92.

41. Brom A.E. Shuteev V.A. Osnovy i perspektivy primeniia informatsionnykh intellektual'nykh sistem dlia protsessov zhiznennogo

tsikla naukoemkikh izdelii [Bases and perspectives of application of information intellectual systems for the life cycle processes of science-intensive products]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: istoriia. Politologiya. Ekonomika. Informatika*. 2009, vol. 12, no. 15-1. pp. 144-150.

42. Lektsiia. Mul'tiagentnye tekhnologii [Lecture. Multiagent technologies]. *NOU INTU-IT*. 2003-2014, available at: <http://www.intuit.ru/> (accessed: 01 January 2013).

43. Sukharev M.G. Innovatsionnaia komp'yuternaia tekhnologiya: optimizatsiia rezhimov gazotransportnykh sistem [Innovative computer technology: optimization of modes of gas transmission systems]. *Matematicheskie modeli i metody analiza i opti-mal'nogo sinteza razvivayushchihnya truboprovodnyh i gidravlicheskih sistem*. Proceedings of the 12th International Seminar. 2010, pp. 40-47.

44. Sukharev M.G. Informatsionnye tekhnologii v transporte i raspredelenii prirodnogo gaza [Information technologies in transport and distribution of natural gas]. *Gazovaya promyshlennost'*. 2010, no. 13, pp. 84-88.

45. Sukharev M.G., Karasevich A.M. Modeli nadezhnosti gazosnabzhaiushchikh sistem [Models of reliability of gas supply systems]. *Avtomatika i telemekhanika*. 2010, no. 7, pp. 149-159.

46. Sukharev M.G., Karasevich A.M. Tekhnologicheskii raschet i obespechenie nadezhnosti gazo- i nefteprovodov [Technological calculation and ensuring the reliability of gas and petroleum pipelines]. Moscow, Izdatel'stvo «Nef't i gaz» RGU nef'ti i gaza im. I. M. Gubkina, 2000, 272 p.

47. Sukharev M.G., Sheleketa V.S. Sistemnyi podkhod k priniatiu reshenii po razvitiuu i rekonstruktsii regional'nykh gazotransportnykh sistem [A System Approach to Decision-Making for the Development and Reconstruction of Regional Gas Transmission Systems]. *Trudy Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta nef'ti i gaza im. I.M. Gubkina*, 2010, no. 1, pp. 58-66.

Получено 14.10.2017

### Об авторах

**Мошев Евгений Рудольфович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, технический директор ООО «УралПромБезопасность», (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 4, e-mail: [emoshev@uralpb.ru](mailto:emoshev@uralpb.ru)).

**Мырзин Глеб Семенович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, ведущий эксперт отдела ИТ ООО «УралПромБезопасность», (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 4, e-mail: [gleb@uralpb.ru](mailto:gleb@uralpb.ru)).

**Белов Владислав Дмитриевич** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Машины и аппараты производственных процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 9, e-mail: [vladislav.belov.199@yandex.ru](mailto:vladislav.belov.199@yandex.ru)).

**Устинов Глеб Андреевич** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Машины и аппараты производственных процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 9, e-mail: [glebbb@inbox.ru](mailto:glebbb@inbox.ru)).

### **About the authors**

**Evgeniy R. Moshev** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Technical Director ООО «UralPromBezopasnost», (4, Akademik Koroljov str., 614013, Perm, e-mail: [emoshev@uralpb.ru](mailto:emoshev@uralpb.ru)).

**Gleb S. Myrzin** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Leading expert of Department IT ООО «UralPromBezopasnost», (4, Akademik Koroljov str., 614013, Perm, e-mail: [gleb@uralpb.ru](mailto:gleb@uralpb.ru)).

**Vladislav D. Belov** (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Perm National Research Polytechnic University (9, Professor Pozdeev str., 614013, Perm, e-mail: [vladislav.belov.199@yandex.ru](mailto:vladislav.belov.199@yandex.ru)).

**Gleb A. Ustinov** (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Perm National Research Polytechnic University (9, Professor Pozdeev str., 614013, Perm, e-mail: [glebbb@inbox.ru](mailto:glebbb@inbox.ru)).