

DOI: 10.15593/2224-9400/2017.4.11

УДК 621.643: 004.9

Е.Р. Мошев

ООО «УралПромБезопасность», Пермь, Россия

В.Д. БеловПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
ТРУБОПРОВОДОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ
КАК ОБЪЕКТА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Существенным фактором обеспечения экономической эффективности, безопасности и надежности нефтехимических предприятий является интегрированная логистическая поддержка технологических трубопроводов. Первичным этапом реализации этого организационно-технологического и инженерно-технического процесса является тщательный системный анализ этапов жизненного цикла объекта поддержки, в данном случае – технологических трубопроводов. В соответствии со сказанным в статье даны результаты системного анализа жизненного цикла трубопроводов, эксплуатируемых на нефтехимических предприятиях. Рассмотрены различные способы классификации трубопроводов. Показано, что для трубопроводов нефтехимических предприятий основным является способ классификации по требованиям промышленной безопасности, так как в соответствии с ним устанавливаются технические нормы, предъявляемые к конструкции, монтажу, объему контроля и условиям технического обслуживания трубопроводов, и пользуются этой классификацией на протяжении всего жизненного цикла трубопроводных систем. Наибольшее внимание уделено этапам проектирования, монтажа и эксплуатации трубопроводов. Для каждого из указанных этапов приведен перечень задач, требующих интеллектуальной и информационной поддержки. На этапе проектирования к таким задачам относятся определение классификации трубопровода, а также выбор характеристик конструктивных элементов и построение трассы трубопровода. На этапе монтажа – выбор способов разделки кромок под сварку и марок сварочных электродов. На этапе эксплуатации – мониторинг технического состояния трубопроводных систем, а также формирование эксплуатационной и ремонтной документации. В процессе анализа указанных задач выявлены взаимные информационные связи между всеми этапами жизненного цикла трубопроводов. Установлено также, что между характеристиками трубопроводов, конструктивных элементов и перемещаемой среды существуют за-

висимости, которые в большинстве случаев имеют дискретный характер и могут быть формализованы с помощью методов теории искусственного интеллекта.

Ключевые слова: *системный анализ, трубопровод, жизненный цикл, интеллектуальная поддержка, электронный паспорт.*

E.R. Moshev

LLC «UralPromBezopasnost», Perm, Russian Federation

V.D. Belov

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

SYSTEM ANALYSIS OF PETROCHEMICAL PLANT PIPELINES LIFE CYCLE AS AN OBJECT OF COMPUTER MODELLING

The integrated logistic support of industrial pipelines is an important factor to achieve commercial efficiency, safety and robustness of a petrochemical plant. The first step of realization this organizational and technological, engineering and technical process is through system analysis of stages of supported object life cycle, industrial pipelines in this case. According to this in this paper results of system analysis of pipelines life cycle are produced. Various methods of pipelines classification are considered. It is shown that classification method according to industrial safety requirements is the main for petrochemical plant pipelines, because technical standards are established in accordance with it. The technical standards for construction, installation, scope of control and maintenance of pipelines are used throughout the pipeline lifecycle. Most attention to stages of pipelines design, installation and exploitation is paid. Tasks that require intellectual and information support for each of the indicated stages are given. The tasks are definition of the pipeline classification, also choice of structural elements characteristics and pipeline route design at the design stage. At the installation stage, the tasks are to choose methods of cutting edges for welding and an electrode mark. At the exportation stage, the tasks are to monitor the technical condition of pipeline system also to form operational and repair documentation. In the process of analyzing these problems, mutual information connections between all stages of the pipelines life cycle are identified. It is also determined that there are connections between characteristics of the pipelines, structural elements and transported substance which are discrete in nature in most cases and can be formalized by the methods of artificial intelligence theory.

Keywords: *system analysis, pipeline, life cycle, intellectual support, electronic passport.*

На протяжении всего жизненного цикла (ЖЦ) сложных трубопроводов нефтехимических предприятий (НХП) необходимо решать большое количество задач, требующих интеллектуальной поддержки, а также выполнения рутинных процедур, связанных с поиском и обработкой различных данных, формированием технической документации [1–3].

В частности, на этапе проектирования такими задачами являются [1, 4–7]:

- определение характеристик классификации трубопроводов;
- определение общих технических характеристик трубопровода и конструкционных характеристик его элементов;
- создание трехмерной модели трубопровода;
- выполнение расчетов на прочность;
- выполнение гидравлических расчетов;
- создание изометрических схем и чертежей;
- расчет количества и суммарной массы элементов трубопровода;
- формирование проектной документации.

Рассмотрим последовательно сущность изложенных выше задач.

Существует четыре основных способа классификации промышленных трубопроводов (рисунок): 1) по требованиям промышленной безопасности (тип, группа и категория); 2) по производственному масштабу; 3) температуре рабочей среды; 4) по давлению рабочей среды.

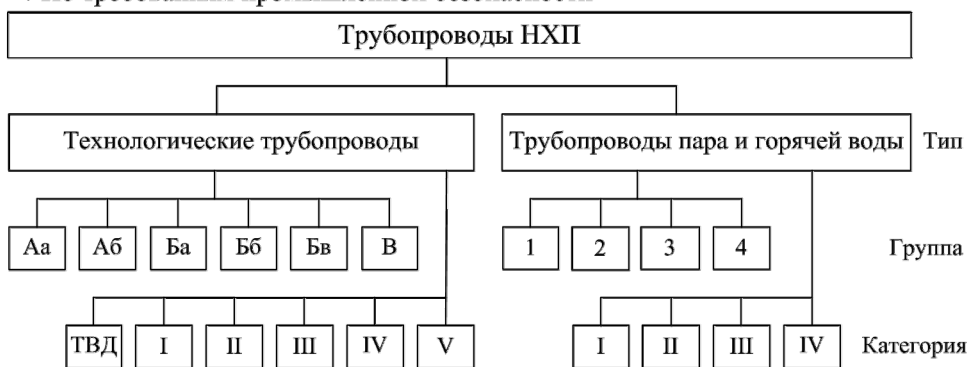
В настоящей статье рассмотрен способ классификации по требованиям промышленной безопасности, а именно – по типу, группе и категории трубопровода. Выбор классификации указанного типа обусловлен тем, что в соответствии с ней устанавливаются технические нормы, предъявляемые к конструкции, монтажу, объему контроля и условиям технического обслуживания трубопроводов, и пользуются этой классификацией на протяжении всего ЖЦ трубопроводных систем.

При анализе нормативно-технической документации установлено, что тип, группа и категория трубопровода задаются правилами безопасности, зависят от диаметра трубопровода; вещественного состава, температуры и давления рабочей среды, и могут быть определены путем решения уравнения

$$(T_t, G_r, K_t) = F(T_{ср}, P, t, D_o),$$

где T_t , G_r , K_t – тип, группа и категория трубопровода соответственно; $T_{ср}$ – тип среды по классу опасности; P , t – избыточное давление и температура рабочей среды; D_o – диаметр, определяющий тип трубопровода.

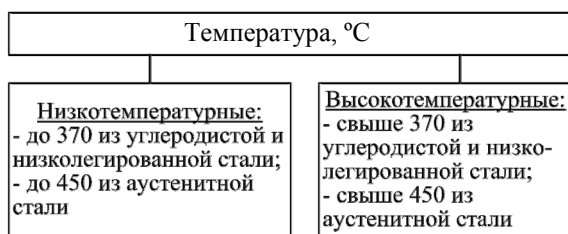
1. По требованиям промышленной безопасности



2. По производственному масштабу



3. По температуре рабочей среды



4. По давлению рабочей среды

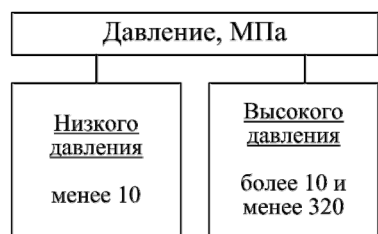


Рис. Основные способы классификации трубопроводов

Определение общих технических характеристик трубопровода включает в себя выбор основного материала, расчет основного диаметра и пробного давления (давления испытаний) трубопровода. Выбор материала и расчет диаметра трубопровода осуществляются с помощью данных о химическом составе, давлении и температуре рабочей среды, а также с помощью стандартов на технические условия изготовления и сортамент элементов трубопровода. Пробное давление рассчитывается с помощью механических характеристик материала трубопровода, давления и температуры рабочей среды. Зависимость между общими техническими характеристиками и определяющими их значение параметрами имеет дискретный характер и может быть формализована в виде производственных правил. Это позволяет автоматизировать процедуры

определения общих технических характеристик трубопровода с помощью эвристическо-вычислительных алгоритмов.

Определение конструкционных характеристик элементов трубопроводов включает выбор материала изготовления, геометрических размеров, стандартов на технические требования и сортамент, расчет проектной и отбраковочной толщин стенки. В общем случае количество типов элементов трубопровода и их разновидностей составляет величину порядка сотни единиц, а количество размеров каждой разновидности элемента – до нескольких десятков. При этом для каждого типа элемента существуют индивидуальный набор конструкционных характеристик и индивидуальные правила их выбора и расчета, что делает определение конструкционных характеристик элементов трубопровода трудоемкой и рутинной процедурой. Например, для элемента «Труба» требуется определить следующие характеристики: материал изготовления и стандарт на материал; стандарты на технические требования и сортамент; значение наружного диаметра; отбраковочная, минимально допустимая проектная и номинальная толщины стенки; тип, марка, длина и масса трубы.

В процессе систематизации правил выбора и расчета характеристик различных конструкционных элементов установлено, что зависимость между искомыми характеристиками элементов и определяющими их значения параметрами имеет преимущественно дискретный характер и может быть формализована с использованием теории множеств и логики предикатов [8, 9], а также производственных правил [10, 11]. При этом процедуру определения характеристик элементов в общем случае можно описать выражением

$$\langle XЭ_f \rangle = (ke_{f,1}, \dots, ke_{f,i}, \dots, ke_{f,N}) = F \langle ПТ_f \rangle, \quad (1)$$

где $\langle XЭ_f \rangle$ – подмножество характеристик элемента f -го типа; $f = \overline{1, N_f}$, N_f – количество типов элементов трубопровода; $ke_{f,i}$ – i -я характеристика f -го типа элемента трубопровода; $\langle ПТ_f \rangle$ – подмножество параметров трубопровода, необходимых для определения параметров элемента f -го типа.

Для каждого типа элемента трубопровода выражение (1) будет иметь уникальный вид и содержать различные характеристики. Например, для типа элемента «Труба» оно примет следующий вид:

$$\langle S_n, S_o, C_t, C_{Ct}, C_{Tt}, G_t, T_{tr}, B_I, C_{rt} \rangle = F(T_{cr}, t, P, D_y),$$

где S_n и S_o – номинальная и отбраковочная толщины стенки; C_t – марка стали; C_{Ct} – стандарт на марку стали; C_{Tt} – стандарт на технические требования изготовления трубы; G_t – группа труб; T_{tr} – тип труб; B_I – вид испытаний; C_{rt} – стандарт на сортамент трубы; D_y – условный диаметр трубы.

После выбора и расчета характеристик конструктивных элементов осуществляется предварительная отрисовка трубопроводной трассы, в результате выполнения которой создается исходная геометрическая модель конструкции трубопровода, которую целесообразно использовать для автоматизации выполнения расчетов на прочность, формирования чертежей и изометрических схем. Созданная модель также востребована при решении многих задач, выполняемых на протяжении всего жизненного цикла трубопровода, поэтому очень важно, чтобы она была электронной и доступной всем субъектам ЖЦ. Анализ процедур ЖЦ трубопроводных систем показывает, что геометрическая модель должна быть трехмерной, содержать топологию, а также характеристики элементов и мест соединений элементов. Кроме этого, модель должна содержать информацию о взаимной системной связи трубопроводов с технологическим оборудованием: сосудами, аппаратами и динамическим оборудованием (компрессоры, насосы, вентиляторы).

При анализе задачи расчета на прочность было выявлено два подхода: расчет на прочность отдельных элементов трубопровода и расчет на прочность трубопровода как цельной конструкции. Оба типа расчета могут быть автоматизированы с помощью вышеуказанной модели.

Задача расчета на прочность отдельных элементов трубопровода включает расчет отбраковочной и проектной толщин стенки и математически достаточно проста, поэтому часто выполняется параллельно с определением других характеристик конструктивных элементов. При этом расчет отбраковочной толщины стенки элементов практически всегда многократно повторяется на протяжении всего ЖЦ трубопровода, например, при проведении ревизий или экспертиз промышленной безопасности.

Расчет на прочность трубопровода как цельной конструкции является достаточно сложным и осуществляется с помощью специализированных комплексов программ. Этот расчет выполняется преимущественно

но на стадии проектирования или реконструкции трубопроводов и с точки зрения концепций интегрированной логистической поддержки при разработке новых комплексов программ будет правильной не воспроизводить алгоритмы прочностного расчета, а осуществлять интеграцию с уже существующим специализированным программным обеспечением.

В процессе выполнения прочностных расчетов геометрическая модель, как правило, корректируется и после корректировки может быть использована для автоматизированного формирования изометрических схем и чертежей. Чертежи разрабатываются на этапе проектирования, а изометрические схемы, как правило, на этапах монтажа и эксплуатации. При этом системный анализ процедур работы с проектной документацией на этапе монтажа трубопроводов, а также опрос экспертов прикладной области показывают, что качество монтажных работ будет выше, а сроки их выполнения меньше, если проектная организация будет передавать вместе с чертежами и изометрические схемы трубопроводов.

Процедуры расчета общей протяженности, суммарной массы и количества элементов трубопровода используются для оценки материальных затрат на строительство и востребованы на всех этапах ЖЦ трубопроводных систем. При создании электронной геометрической модели трубопровода указанные процедуры могут быть легко автоматизированы.

Полная проектная документация, включая чертежи, изометрические схемы и спецификации, дополненные сведениями о рабочей среде, проектной организации и другими технико-технологическими данными передается монтажной организации. Указанные проектные данные востребованы на протяжении всего ЖЦ трубопровода, поэтому их логично объединить с геометрической моделью трубопровода в единую электронную модель, которую можно назвать компьютерный или электронный паспорт (ЭП) спроектированного трубопровода. Если в информационной структуре ЭП учесть данные, формируемые на этапах монтажа и эксплуатации, то электронный паспорт можно будет использовать на протяжении всего ЖЦ и с его помощью автоматизировать формирование монтажной документации и эксплуатационного паспорта трубопровода в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

Среди задач ИЛП поддержки монтируемых трубопроводов можно указать следующие [12–15]:

- определение необходимых для монтажа количества и массы элементов трубопровода;

- определение характеристик и количества крепежных деталей фланцевых соединений (шпильки, гайки, прокладки);
- формирование технологической карты сварки и определение количества сварочных электродов;
- корректировка изометрических схем по факту монтажа;
- формирование свидетельства о монтаже трубопровода, включающего пакет из десяти документов.

Определение необходимых для монтажа количества и массы элементов трубопровода, а также характеристик и количества деталей крепежа осуществляется по проектной спецификации и является рутинной процедурой, выполнение которой может быть легко автоматизировано.

Формирование технологической карты сварки и определение количества сварочных электродов является наиболее сложной задачей этапа монтажа. При создании технологической карты требуется подобрать форму разделки кромок свариваемых элементов и определить их геометрические характеристики, выбрать требуемые параметры режима электродуговой сварки и термообработки, выбрать и рассчитать необходимое для осуществления сварки количество электродов. При выборе свариваемых элементов необходимо выполнить проверку материала их изготовления, диаметра и толщины стенки. Если конструкционные характеристики свариваемых между собой элементов на этапе проектирования будут внесены в БД, то рутинная процедура проверки материала и геометрии свариваемых элементов может быть автоматизирована с помощью эвристическо-вычислительных алгоритмов. Все описанные процедуры должны выполняться в соответствии с требованиями нормативно-технической документации (НТД) и научно-технической литературы. Анализ НТД показал, что существует не менее восьми типов сварных соединений элементов трубопровода:

- 1) стыковое трубы с трубой, отводом или арматурой;
- 2) стыковое секторов отводов;
- 3) стыковое фланца с трубой;
- 4) нахлесточное промежуточного штуцера с трубой;
- 5) нахлесточное труб с раздочей (увеличением диаметра) одного конца трубы;
- 6) нахлесточное труб с муфтой;
- 7) угловое фланца или кольца с трубой;
- 8) угловое отростка, штуцера ответвления или приварыша с трубой.

Одновременно с перечисленными типами сварных соединений существует несколько десятков вариантов соответствующих им типов разделки кромок свариваемых элементов, каждый тип разделки имеет индивидуальный набор геометрических характеристик. При этом значения геометрических характеристик кромок зависят от типа, взаимного расположения, диаметра и толщины стенки свариваемых элементов и насчитывают не менее сотни модификаций.

После выбора типа разделки кромок и определения их геометрических характеристик осуществляется подбор сварочных электродов. Существуют десятки различных марок электродов, выбор которых осуществляется в соответствии с требованиями научно-технической литературы и НТД и зависит от материала изготовления свариваемых элементов трубопровода, температуры рабочей среды и требований по стойкости к межкристаллитной коррозии (МКК).

Дальнейшей процедурой формирования технологической карты является определение режима сварки, которое включает поиск значений следующих специальных характеристик: число наплавляемых слоев; номера слоев; число валиков; сила тока и диаметр электродов. Определение указанных характеристик зависит: от толщины стенки свариваемых элементов; структуры электрода; полярности тока; расположения стыка (вертикальный или горизонтальный) и от того, поворотным или неповоротным планируется делать сварной шов.

Последней процедурой подготовки технологической карты сварки является определение необходимости проведения термообработки и режима ее проведения. Необходимость проведения термообработки определяется по группе стали, наличию в рабочей среде сероводорода, склонности к МКК и толщине стенки свариваемых элементов. Режим термообработки зависит от марки стали и толщины стенки свариваемых элементов, а также от условий охлаждения (на открытом воздухе, в помещении и т.п.). Выбор режима термообработки заключается в определении следующих характеристик: вид термообработки; температура нагрева; отклонение температуры нагрева; время выдержки.

Исходя из вышесказанного, формирование технологической карты сварки предполагает осуществление множества операций по сверке конструктивных характеристик свариваемых элементов, включая их расположения в пространстве, а также выполнения требующих интеллектуальной поддержки процедур определения формы подготовки кромок свариваемых элементов, марки и количества сварочных электродов, режимных параметров сварки и термообработки.

После выполнения сварочных работ осуществляется корректировка изометрических схем по факту монтажа. При корректировке схем уточняется трасса трубопровода, а также конструктивные характеристики смонтированных элементов и всех выполненных сварных стыков, включая: дату монтажа; род сварки; марку электрода; тип структуры электрода; Ф.И.О., номер удостоверения и номер клейма сварщика; тип сварного соединения; температуру в рабочей зоне; данные о термообработке; номер позиции сварного стыка на схеме.

Одновременно с корректировкой изометрической схемы или после выполнения корректировки осуществляют формирование документации о монтаже трубопровода, включающей пакет из десяти следующих документов:

- 1) свидетельство о монтаже;
- 2) спецификация изделий, применяемых при монтаже;
- 3) журнал сварочных работ;
- 4) список сварщиков, операторов-термистов, дефектоскопистов;
- 5) журнал сборки разъемных соединений;
- 6) список рабочих, допущенных к сборке разъемных соединений;
- 7) акт промежуточной приемки ответственных конструкций;
- 8) журнал учета качества сварных соединений;
- 9) акт испытания трубопровода;
- 10) акт на предварительную растяжку (сжатие) компенсаторов.

При формировании указанного выше пакета документов выполняется много рутинных операций, связанных с поиском, идентификацией и систематизацией большого количества данных о смонтированном трубопроводе.

Далее пакет монтажной документации совместно с пакетом проектной документации передается предприятию-владельцу и используется на протяжении всего ЖЦ трубопровода.

Самое большое количество работ и формируемых документов приходится на этап эксплуатации и ремонта трубопроводных систем. Большое количество работ объясняется длительностью этого этапа по сравнению с проектированием и монтажом, периодичностью формирования документов, а также необходимостью формировать документы не только по отдельно взятому трубопроводу, но и по всей трубопроводной системе установки, производства, предприятия или произвольно выбранной группе трубопроводов. Среди задач этапа эксплуатации можно отметить следующие [16–20]:

- построение (корректировка) изометрической схемы;
- определение периода ревизий;
- внесение изменений в паспортно-техническую документацию по результатам проведенных экспертиз промышленной безопасности и ремонтов;
 - внесение данных в формуляр замеров толщины стенки;
 - внесение записей о ремонтах ревизиях и реконструкциях трубопровода;
 - расчет остаточного ресурса;
 - расчеты отбраковочной толщины стенки элементов трубопровода;
 - выбор элементов с целью замены отбракованных;
 - определение недостающих характеристик конструктивных элементов трубопровода;
 - проверка характеристик трубопроводов и их элементов на соответствие требованиям НТД (задача очень актуальна при потере проектных и монтажных данных);
 - систематизация и обработка данных по элементам трубопроводов;
 - расчет толщины слоя теплоизоляции и площади поверхности покрытия теплоизоляции;
 - формирование следующих документов и отчетов:
 - паспорт трубопровода;
 - спецификации на конструктивные элементы трубопровода;
 - перечни технологических трубопроводов (далее – перечни);
 - акты ревизии и отбраковки;
 - заключения по результатам экспертиз промышленной безопасности;
 - протоколы замера твердости;
 - акты по контролю сварных соединений (для каждого метода контроля свой акт);
 - отчеты по сведениям о сварных соединениях;
 - технологические карты ремонта;
 - удостоверения о качестве ремонта;
 - отчеты о результатах экспертизы (проверки) сварных соединений;
 - отчеты по комплектации трубопроводов;
 - планы-графики ремонтов, ревизий и испытаний трубопроводов и арматуры.

Формирование таких документов, как паспорт, спецификация, перечень, сведения о сварных соединениях, записи о ремонтах, ревизиях и реконструкциях трубопровода, отчеты по комплектации трубопроводов, планы-графики, представляет рутинные процедуры поиска и обработки уже имеющихся в проектной, монтажной и эксплуатационной документации данных с целью представления их в новом формате. Например, при формировании паспорта требуется рассчитать суммарную протяженность труб каждого типа, просуммировать с сортировкой по конструкционным типам количество отводов, переходов, арматуры, тройников, других элементов трубопровода и вписать их все в паспорт в определенном порядке.

Наибольший объем работ приходится на создание перечня по предприятию, при формировании которого необходимо не только собрать технико-технологические данные о трубопроводах и характеристиках элементов для всей трубопроводной системы предприятия, но и систематизировать их по характеристикам классификации в соответствии с требованиями НТД. С учетом того, что количество трубопроводов НХП обычно составляет от двух до десяти тысяч единиц, а обновление перечня должно осуществляться ежегодно, затраты времени на его формирование по факту получаются очень большие.

Наиболее интеллектуально сложными для персонала предприятий и организаций-подрядчиков являются расчеты остаточного ресурса вероятностно-статистическими методами. В этих расчетах требуется учитывать сессии замеров толщин стенки конструкционных элементов, выполненные за весь период эксплуатации трубопровода. По результатам анализа паспортно-технической документации количество сессий замеров нередко бывает более десяти. Это делает расчет остаточного ресурса не только сложной, но и чрезвычайно рутинной процедурой, связанной с необходимостью ввода не только результатов последних произведенных замеров, но и многократного дублирования ввода значений толщины стенки, полученных в более ранних сессиях замеров, что не только отнимает много времени, но и повышает вероятность возникновения ошибок ввода данных.

Формирование практически всех остальных отчетов и документов также сопряжено с выполнением большого количества рутинных процедур поиска и обработки уже внесенных данных с целью представления их в новом формате. При этом часто требуется обращаться к НТД и справочной литературе. Например, при формировании технологической карты ремонта требуется использовать рисунки, поясняющие тип сварного со-

единения и форму разделки кромок свариваемых элементов. А для каждой формы разделки кромок необходим индивидуальный расчет расхода электродов, что существенно увеличивает затраты времени на формирование этой карты. При формировании отчетов по расчету теплоизоляции, отчетов о комплектации трубопроводов, актов ревизии и отбраковки и некоторых других документов требуется выполнять расчет отбраковочной толщины стенки элементов для большого количества трубопроводов. При этом необходимо учитывать характеристики рабочей среды и материал изготовления элементов каждого трубопровода, для чего требуется заниматься поиском не только указанных характеристик, но и механических свойств сталей. Расчет теплоизоляции с последующим формированием отчета требует поиска в справочной литературе теплофизических характеристик различных видов теплоизоляционных материалов.

Исходя из выполненного анализа следует вывод, что на каждом из этапов ЖЦ трубопроводных систем существует большое количество задач, требующих интеллектуальной поддержки при их решении, включающих множество рутинных процедур, связанных с поиском нормативно-технических данных, проведением различных расчетов, осуществлением геометрических построений и формированием большого количества технических документов. Между характеристиками трубопроводов, конструкционных элементов и рабочей среды существуют зависимости, которые в большинстве случаев имеют дискретный характер. Анализ механизмов решения задач ИЛП показал, что большая их часть поддается формализации с помощью моделей и алгоритмов теории искусственного интеллекта, что позволяет осуществить автоматизацию принятия решений ИЛП на всех этапах ЖЦ трубопроводов.

Список литературы

1. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Проектирование и расчет оптимальных систем технологических трубопроводов. – М.: Химия, 1991. – 362 с.
2. Мешалкин В.П., Мошев Е.Р. Режимы функционирования автоматизированной системы «Трубопровод» при интегрированной логической поддержке трубопроводов и сосудов промышленных предприятий // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2014. – № 1. – С. 64–73.
3. Атавин А.А., Карасевич А.М., Сухарев М.Г. Трубопроводные системы энергетики: модели, приложения, информационные технологии. – М.: Нефть и газ, 2000. – 320 с.

4. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов: теория, методы расчета, проектирование. – М.: Недра, 1992. – 271 с.
5. Мошев Е.Р. Информационно-эвристическо-вычислительные модели и алгоритмы принятия решений по интегрированной логистической поддержке трубопроводных систем нефтехимических предприятий: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2015. – 468 с.
6. Трубопроводные системы энергетики: математическое моделирование и оптимизация / Н.Н. Новицкий, М.Г. Сухарев, А.Д. Тевяшев [и др.]. – Новосибирск: Наука, 2010. – 419 с.
7. Миркин А.З., Усиньш В.В. Трубопроводные системы: расчет и автоматизир. проектирование: справ. – М.: Химия, 1991. – 256 с.
8. Бочаров В.А., Маркин В.И. Основы логики. – М.: ИНФРА-М, 2002. – 296 с.
9. Горбатов В.А., Горбатов А.В., Горбатова М.В. Дискретная математика. – М.: АСТ: Астрель, 2003. – 447 с.
10. 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.
11. Мошев Е.Р., Кантюков Р.А. Продукционные модели представления знаний об интегрированной логистической поддержке жизненного цикла промышленных трубопроводов // Логистика и экономика ресурсосбережения в промышленности (МНПК «ЛЭРЭП-8-2014»): сб. науч. тр. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф. – М.: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та им. Ю.А. Гагарина, 2014. – С. 153–156.
12. Орельяна И. У. Технологические трубопроводы: техническая подготовка производства монтажных работ // CADmaster. – 2003. – № 3. – С. 54–59.
13. Программное средство для непрерывной информационной поддержки промысловых и технологических трубопроводов на этапах монтажа и эксплуатации / Е.Р. Мошев, Г.С. Мырзин, Н.М. Рябчиков, В.Г. Власов, Е.В. Шестаков // Бурение & нефть. – 2010. – № 1. – С. 59–61.
14. Сварка. Резка. Контроль: справ.: в 2 т. / под ред. Н. П. Алешина [и др.]. – М.: Машиностроение, 2004. – Т.1. – 624 с.
15. Сварка. Резка. Контроль: справ.: в 2-х т. / под ред. Н. П. Алешина [и др.]. – М.: Машиностроение, 2004. – Т. 2. – 480 с.
16. Гумеров И. К. Методология экспертизы безопасности длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов на основе математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2006. – 156 с.

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

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

19. Программное средство для автоматизации информационной поддержки и обеспечения промышленной безопасности технологических трубопроводов / Е.Р. Мошев, О.И. Мухин, Н.М. Рябчиков, Г.С. Мырзин [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2007. – № 10. – С. 24–29.

20. Тавастшерна Р.И., Бесман А.И., Позднышев В.С. Технологические трубопроводы промышленных предприятий. – М.: Стройиздат, 1991. – 655 с.

References

1. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Proektirovanie i raschet optimal'nykh sistem tekhnologicheskikh truboprovodov [Design and calculation of optimal systems of industrial pipelines]. Moscow, Khimiia, 1991, 362 p.

2. Meshalkin V.P., Moshev E.R. Rezhimy funktsionirovaniia avtomatizirovannoi sistemy «Truboprovod» pri integrirovannoi logisticheskoi podderzhke truboprovodov i sosudov promyshlennykh predpriatii [Modes of functioning of the automated system "Pipeline" with integrated logistic support of pipelines and vessels of industrial plants]. *Problemy mashinostroeniia i avtomatizatsii*. 2014, no. 1, pp. 64-73.

3. Atavin A.A., Karasevich A.M., Sukharev M.G. Truboprovodnye sistemy energetiki: modeli, prilozheniia, informatsionnye tekhnologii [Pipeline energy systems: models, applications, information technologies]. Moscow, Rossiiskii Gosudarstvennyi Universitet Nefti i Gaza im. I.M. Gubkina, 2000, 320 p.

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

5. Moshev E.R. Informacionno-jevristical'esko-vychislitel'nye modeli i algo-ritmy prinjatija reshenij po integrirovannoj logisticheskoi podderzhke trubopro-vodnykh sistem neftehimicheskikh predpriiatij [Information-heuristic computing models and decision-making algorithms for complex logistic support of pipeline systems of petrochemical enterprises]. Doctor's degree dissertation. Moscow, 2015, 468 p.

6. Novickij N.N., Suharev M.G., Tevjashev A.D. et al. Truboprovodnye sistemy jenergetiki: matematicheskoe modelirovanie i op-timizacija. Novosibirsk: Nauka, 2010, 419 p.

7. Mirkin A.Z., Usin'sh V.V. Truboprovodnye sistemy: raschjot i avtomatizir. Proektirovanie [Pipeline systems: calculation and computer-aided design]: Spravochnik. Moscow, Himija, 1991, 256 p.

8. Bocharov V.A., Markin V.I. Osnovy logiki [Basics of Logic]. Moscow, Infra-M, 2002. – 296 p.

9. Gorbatov V.A., Gorbatov A.V., Gorbatova M.V. Diskretnaja matematika [Discrete Math]. Moscow: AST: Astrel', 2003, 447 p.

10. Meshalkin V.P., Shubin I.A. Produkcionnaja model' optimal'noj trassi-rovki sistem tehnologicheskikh truboprovodov [The production model of the optimal tracing of industrial pipelines systems]. IV Vses. konf. «Mat. metody v himii» (MMH-6-89), Novoчерkassk, 1989, pp. 124-125.

11. Moshev E.R., Kantjukov R.A. Produkcionnye modeli predstavlenija znaniy ob integrirovannoj logisticheskoy podderzhke zhiznennogo cikla promyshlennykh truboprovodov [Production models of knowledge representation about integrated logistic support of the industrial pipelines life cycle]. *Logistika i Jekonomika Resursosberezhenija v Promyshlennosti (MNPK «LJeRJeP-8-2014»): sb. nauch. tr. po materialam VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 19-20 November 2014.:* Moscow, Saratovskiy Gosudarstvennii Tehniceskiy Universitet im. Gagarina Ju.A. 2014, pp. 153-156.

12. Orel'jana I.U. Tehnologicheskie truboprovody: tehniceskaja podgotovka proizvodstva montazhnyh rabot [Technological pipelines: technical preparation of installation works]. *CADmaster*, 2003, no. 3, pp. 54-59.

13. Moshev E.R., Myrzin G.S., Rjabchikov N.M., Vlasov V.G., Shestakov E.V. Pro-grammnoe sredstvo dlja nepreryvnoj informacionnoj podderzhki promyslovyh i tehnologicheskikh truboprovodov na jetapah montazha i jekspluatacii [Software for continuous information support of field and process pipelines during the installation and operation phases]. *Burenie & neft'*, 2010, no. 1.

14. Aleshin N.P. et al. Svarka. Reзка. Kontrol' [Welding. Cutting. Control]. Moscow, Mashinostroenie, 2004, vol. 1, 624 p.

15. Aleshin N.P. et al. Svarka. Reзка. Kontrol' [Welding. Cutting. Control]. Moscow, Mashinostroenie, 2004, vol. 2, 480 p.

16. Gumerov I.K. Metodologija jeksPERTIZY bezopasnosti dlitel'no jekspluati-ruemyh magistral'nyh truboprovodov na osnove matematicheskogo modelirovanija [Methodology of safety expertise of long-term main pipelines based on mathematical modeling]: dis. ... kand. tehn. nauk. Ufa, 2006, 156 p.

17. Jakovlev E.I. et al. Modelirovanie zadach jekspluatacii sistem truboprovodnogo transporta [Modeling of tasks of operation of pipeline transport systems]. Moscow, VNIIOJeNG, 1992, 359 p.

18. Mahkin I.R., Nashhubskij V.A. Opyt sozdaniija sistemy ocenki riskov na osnove informacionnoj 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.

19. Moshev E.R., Muhin O.I., Rjabchikov N.M., Myrzin G.S. i dr. Programmnoe sredstvo dlja avtomatizacii informacionnoj podderzhki i obespechenija promyshlennoj bezopasnosti tehnologicheskikh truboprovodov [Software for automation of information support and industrial safety of process pipelines]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2007, no. 10, pp. 24-29.

20. Tavastsherna R.I., Besman A.I., Pozdnyshev V.S. Tehnologicheskie truboprovody promyshlennykh predpriyatij [Technological pipelines of plants]. Moscow, Strojizdat, 1991, 655 p.

Получено 21.10.2017

Об авторах

Мошев Евгений Рудольфович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, технический директор ООО «УралПромБезопасность» (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 4, e-mail: erm@pstu.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).

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: erm@pstu.ru).

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