

УДК 004.9: 621.646.9

Е.Р. Мошев¹, В.П. Мешалкин²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ЭВРИСТИЧЕСКО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫБОРЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Показаны недостатки осуществления интегрированной логистической поддержки оборудования нефтехимических предприятий и, в частности, технологических трубопроводов. Отмечено, что причинами этих недостатков являются низкий уровень автоматизации процедур интеллектуальной поддержки в процессах принятия инженерно-технических решений и обработки эксплуатационной технической информации.

Представлены результаты анализа научных исследований и достижений в области прикладных информационных технологий. Показано, что для устранения существующих недостатков интегрированной логистической поддержки технологических трубопроводов необходимо применять специальные эвристическо-вычислительные инструменты, разработанные с использованием системного подхода, методов теории искусственного интеллекта и логистики ресурсосбережения в сфере организации производства, а также концепций интегрированной информационной среды.

Приведены результаты анализа нормативно-технической документации, в котором выявлены основные конструкционные характеристики нескольких трубопроводных элементов – отводов, переходов и тройников. Систематизация правил выбора и расчёта характеристик конструкционных элементов показала, что зависимость между искомыми характеристиками элементов и определяющими их значения входными параметрами технологических трубопроводов имеет дискретный характер и в общем случае может быть описана с помощью нормативно-справочных отношений. При этом отмечается, что для каждого типа конструкционного элемента трубопровода наблюдаются индивидуальный набор и состав нормативно-справочных отношений.

Даны результаты разработки эвристическо-вычислительных инструментов, которые позволяют автоматизировать принятие решений при выборе конструкционных характеристик указанных выше элементов технологических трубопроводов. При разработке эвристическо-вычислительных инструментов использованы производственные модели представления знаний и эвристическо-вычислительные алгоритмы.

Рассмотрен пример разработки эвристическо-вычислительных инструментов, позволяющих автоматизировать определение недостающих в паспортно-технической документации конструкционных характеристик элементов трубопровода, что является актуальной практической задачей.

Ключевые слова: интегрированная логистическая поддержка, технологические трубопроводы, модели представления знаний, производственные правила, эвристическо-вычислительные алгоритмы.

E.R. Moshev¹, V.P. Meshalkin²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Russian Chemical-Technological University named after D.I. Mendeleev,
Moscow, Russian Federation

THE DEVELOPMENT OF HEURISTIC COMPUTATIONAL DECISION-MAKING TOOLS WHEN SELECTING CHARACTERISTICS OF THE ELEMENTS OF TECHNOLOGICAL PIPELINES

The shortcomings of integrated logistics support for petrochemical equipment and, in particular, technological pipelines are shown. It is noted that the reasons for these shortcomings are the low level of automation of intellectual support procedures in the processes of engineering and technical decision-making and processing of operational technical information.

The results of the analysis of scientific research and achievements in the field of applied information technologies are presented. It is shown that to eliminate the existing shortcomings of integrated logistics support of technological pipelines it is necessary to use special heuristic-computing tools developed using a system approach; methods of artificial intelligence and logistics theory of resource saving in the field of production organization, as well as concepts of integrated information environment.

The results of the analysis of normative and technical documentation, which identified the main structural characteristics of several pipeline elements-bends, transitions and tees. The systematization of the rules of selection and calculation of the characteristics of structural elements showed that the relationship between the desired characteristics of the elements and the input parameters of the process pipelines determining their values is discrete and in General can be described with the help of regulatory reference relations. It is noted that for each type of structural element of the pipeline there is an individual set and the composition of regulatory and reference relations.

The results of the development of heuristic-computing tools that allow you to automate decision making when choosing the structural characteristics of the above elements of process pipelines. In the development of heuristic-computational tools used production models of knowledge representation and heuristic-computational algorithms.

An example of the development of heuristic-computing tools to automate the definition of missing in the passport-technical documentation of the structural characteristics of the elements of the pipeline, which is an actual practical problem.

Keywords: integrated logistics support, technological pipelines, models of knowledge representation, production rules, heuristic-computational algorithms.

Введение. Важнейшим фактором обеспечения экономической эффективности, безопасности и надёжности предприятий нефтехимического комплекса является интегрированная логистическая поддержка (ИЛП) производственного оборудования, в частности технологических трубопроводов (ТТ) [1–3]. Интегрированная логистическая поддержка ТТ – это трудоёмкий и затратный по времени процесс, сопряжённый с поиском и обработкой большого количества нормативно-технических данных, требующий создания на каждом этапе жизненного цикла (ЖЦ) изометрических схем и чертежей, содержащий большое количество ру-

тинных инженерно-технических расчётов. Выполнение ИЛП дополнительно осложняется низким уровнем автоматизации процедур интеллектуальной поддержки при принятии инженерно-технических решений и обработке эксплуатационно-технической информации. Вследствие изложенного процесс ИЛП технологических трубопроводов имеет ряд существенных недостатков, среди которых можно отметить: большое количество информационных ошибок и противоречивость данных; низкие скорость и качество формирования проектной, монтажно-исполнительной, паспортно-технической и эксплуатационной документации; трудоёмкость проведения необходимых инженерно-технических и организационно-управленческих расчётов; сложность обмена информацией между субъектами ЖЦ. Приведённые недостатки значительно снижают качество ИЛП, и, как следствие, уменьшаются показатели надёжности, промышленной безопасности и экономической эффективности производственных предприятий в целом.

Анализ состояния научных исследований по ИЛП технологического оборудования в различных отраслях промышленности показал, что для устранения существующих недостатков необходимо применять специальные эвристическо-вычислительные инструменты (ЭВИ), разработанные с использованием системного подхода [4–6], методов теории искусственного интеллекта и логистики ресурсосбережения в сфере организации производства [7–10], а также концепций интегрированной информационной среды [1, 2, 11–17]. Руководствуясь результатами проведённого анализа, авторы разработали около двадцати ЭВИ, формализующих процесс принятия решений по ИЛП жизненного цикла технологических трубопроводов. В настоящей статье даны примеры ЭВИ, позволяющих автоматизировать процедуры принятия решений при выборе конструкционных характеристик элементов проектируемых, а также процедуры определения недостающих конструкционных характеристик элементов действующих ТТ.

1. Эвристическо-вычислительные инструменты проектируемых технологических трубопроводов. Одной из важнейших проектных процедур, обеспечивающих надёжность ТТ на этапе эксплуатации, является определение характеристик конструкционных элементов. Как правило, количество применяемых на нефтехимических предприятиях типов элементов трубопровода составляет не менее двадцати единиц при количестве размеров каждого типа элемента также не менее

двадцати вариантов. При этом для каждого типа элемента ТТ существуют индивидуальный набор конструкционных характеристик, а также индивидуальные правила их выбора и расчёта, что делает процесс ручного определения характеристик достаточно трудоёмкой и рутинной процедурой. Например, для элемента «труба» требуется определить следующие характеристики: материал изготовления и стандарт на него; стандарты на технические требования и сортамент; значение наружного диаметра; значения отбраковочной, минимально-допустимой и номинальной толщин стенки; тип, марка, длина и масса трубы.

В процессе систематизации правил выбора и расчёта характеристик различных конструкционных элементов установлено, что зависимость между искомыми характеристиками элементов, с одной стороны, и определяющими их значения входными параметрами, с другой стороны, имеет дискретный характер и в общем случае может быть представлена следующим выражением:

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

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

Непосредственное определение характеристик каждого типа элемента осуществляется с помощью индивидуальных алгоритмов, которые в общем случае можно свести к поиску в специально сформированных массивах нормативных отношений $(XЭ_f) = (ke_{f,1}, \dots, ke_{f,i}, \dots, ke_{f,N})$ строк, удовлетворяющих условию:

$$(XЭ_f) \cap (ПТ_f) \neq \{ \} \quad (2)$$

При этом для каждого типа элемента трубопровода выражения (1, 2) будут иметь уникальный вид. Практическая реализация процедур определения конструкционных характеристик элементов ТТ осуществлялась с помощью специально разработанных моделей представления знаний (МПЗ) в виде продукционных правил [14] и эвристическо-вычислительных алгоритмов [18].

Производственные МПЗ или производственные правила применяются в системах искусственного интеллекта для представления знаний о различных объектах и обладают следующими достоинствами [3, 14, 19, 20]:

- обеспечение быстрого отклика на изменяющиеся в широких пределах ситуации внешней среды;

- возможность независимого добавления в базу знаний отдельных производственных правил без перепрограммирования всей программной системы;

- простота понимания человеком или интерпретации другой программной системой;

- естественность выражения как декларативных, так и процедурных знаний, при этом знания отделены от способа их переработки.

Разработка производственных МПЗ осуществлялась с помощью анализа нормативно-технической, паспортно-технической, эксплуатационной и ремонтной документации, а также с учётом знаний экспертов прикладной области и особенностей этапов ЖЦ технологических трубопроводов. При анализе учитывались методические рекомендации, приведённые в источнике [14].

Производственные МПЗ и эвристическо-вычислительные алгоритмы были разработаны для определения конструктивных характеристик пяти основных типов элементов ТТ: труб; фланцев; отводов; переходов и тройников. Ниже приведены примеры МПЗ и эвристическо-вычислительных алгоритмов для трёх элементов: отводов, переходов и тройников.

1.1. Эвристическо-вычислительные инструменты определения характеристик конструкционного элемента «отвод». Отводом называется фасонная деталь трубопровода, обеспечивающая изменение направления потока транспортируемого вещества.

В результате анализа большого количества нормативно-технической документации (НТД) установлено, что отводы имеют следующие конструктивные характеристики (рис.1): *To* – тип отвода (крутоизогнутый, гнутый, штамповочный, секционный); *Ст* – марка стали (более 80 наименований); *ССт* – стандарт на сталь (более 10 наименований); *СТТ* – стандарт на технические требования (более 18 наименований); *Срт* – стандарт на сортамент (более 16 наименований); *Дн* – наружный диаметр (более 20 вариантов); *Sn* – номинальная толщина стенки (более 20 вариантов); *L* – длина (более 20 вариантов);

S_o – отбраковочная толщина стенки (расчётная характеристика); S_u – способ изготовления (бесшовный, из бесшовных труб, из электросварных труб, сварной, сварной из бесшовных труб, сварной из электросварных труб, штампосварной); α_2 – уголгиба (30, 45, 60 или 90 градусов); R_2 – радиусгиба (более 20 вариантов).

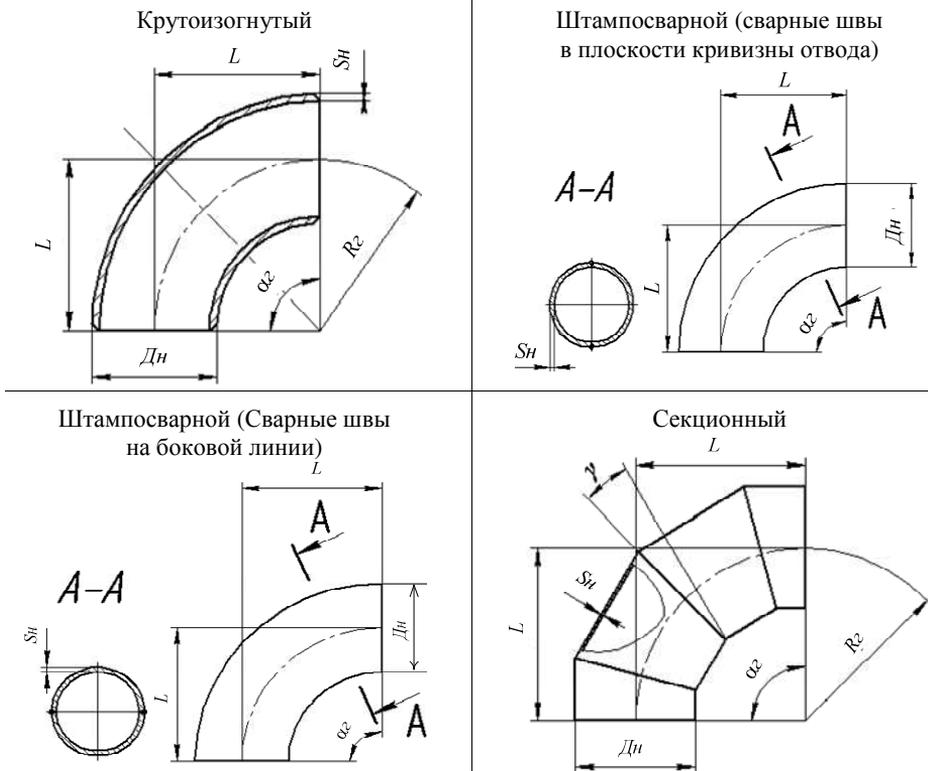


Рис. 1. Типы и геометрические характеристики отводов

Также установлено, что рекомендуемые НТД значения характеристик отводов полностью зависят от параметров: T_{cp} , t , P и D_u , где T_{cp} , t , P – тип, температура и давление рабочей среды, D_u – условный диаметр отвода.

Выражения 1 и 2 для типа элемента «отвод» принимают следующий вид:

$$(S_n, D_n, C_m, CC_m, CTT, T_o, C_{pm}, S_o, C_u, \alpha_2, R_2, L) = F(T_{cp}, t, P, D_u)$$

и

$$(T_{cp}, (D_u, R_2), (t, R_2), (\sigma, R_2), P_u, D_n, S_{nn}, C_m, CC_m, T_o, C_{pm}, C_u, \alpha_2, R_2, L) \cap (T_{cp}, t, P, D_u) \neq \{ \},$$

где σ – напряжение в отводе, возникающее под воздействием давления рабочей среды; R_2 – отношение бинарности (min; max); P_y – условное давление.

Примеры производственных МПЗ о конструктивных характеристиках отводов приведены в табл. 1, где индексы min и max относятся к заданным в НТД граничным значениям соответствующих переменных; I – идентификатор строк в таблице.

Таблица 1

Пример производственной модели представления знаний об отводах

| I | Dy^{min} | Dy^{max} | T_{cp} | t^{min} | t^{max} | P_y | D_n | S_n | S^{min} | S^{max} | σ^{min} | σ^{max} | C_t |
|-----|------------|------------|------------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-----------|-----------|----------------|----------------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 1 | 10 | 300 | Дизтопливо | -40 | 475 | 10 | 273 | 6 | 0 | 12 | 0,35 | 100 | 20 |
| 2 | 10 | 300 | Дизтопливо | -30 | 475 | 10 | 159 | 4,5 | 0 | 12 | 0,35 | 100 | 20 |
| 3 | 10 | 300 | Дизтопливо | -40 | 475 | 10 | 108 | 5 | 0 | 12 | -1 | 0,35 | 20 |

Окончание табл. 1

| α_2 | C_{ct} | C_{tt} | T_o | C_i | C_{rg} | R_g | L |
|------------|-------------|--------------|----------------|-----------|--------------|-------|-----|
| 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| 90 | ГОСТ 1050 | ГОСТ 17380 | Крутоизогнутый | Бесшовный | ГОСТ 17375 | 375 | 375 |
| 90 | ГОСТ 1050 | ОСТ 36-49-81 | Гнутый | Бесшовный | ОСТ 36-42-81 | 500 | 500 |
| 60 | ТУ 14-3-460 | ГОСТ 17380 | Крутоизогнутый | Бесшовный | ГОСТ 30753 | 100 | 58 |

Блок-схема эвристическо-вычислительного алгоритма определения конструктивных характеристик отвода, реализованного с помощью разработанных и сведённых в производственную базу знаний (ПБЗ) производственных МПЗ, приведена на рис. 2, где R – промежуточная переменная; $TЭ$ – тип элемента трубопровода; $[\sigma]_{20}$, $[\sigma]^t$ – допустимое напряжение стали при температуре 20 град и расчётной температуре рабочей среды; P_{20} – давление рабочей среды, приведённое к температуре 20 °С; $k_1(T_o)$ – поправочный коэффициент увеличения напряжений.

Разработанный алгоритм определения характеристик элемента «отвод» отличается тем, что по заданным исходным значениям условного диаметра Dy , углагиба α_2 , типа T_{cp} , температуры t и давления P рабочей среды, а также с помощью производственных МПЗ о характеристиках технологических трубопроводов и базы механических свойств сталей (БМСС) позволяет автоматизировать интеллектуальные процедуры принятия решений при определении соответствующих требованиям НТД значений характеристик конструкционного элемента «отвод».

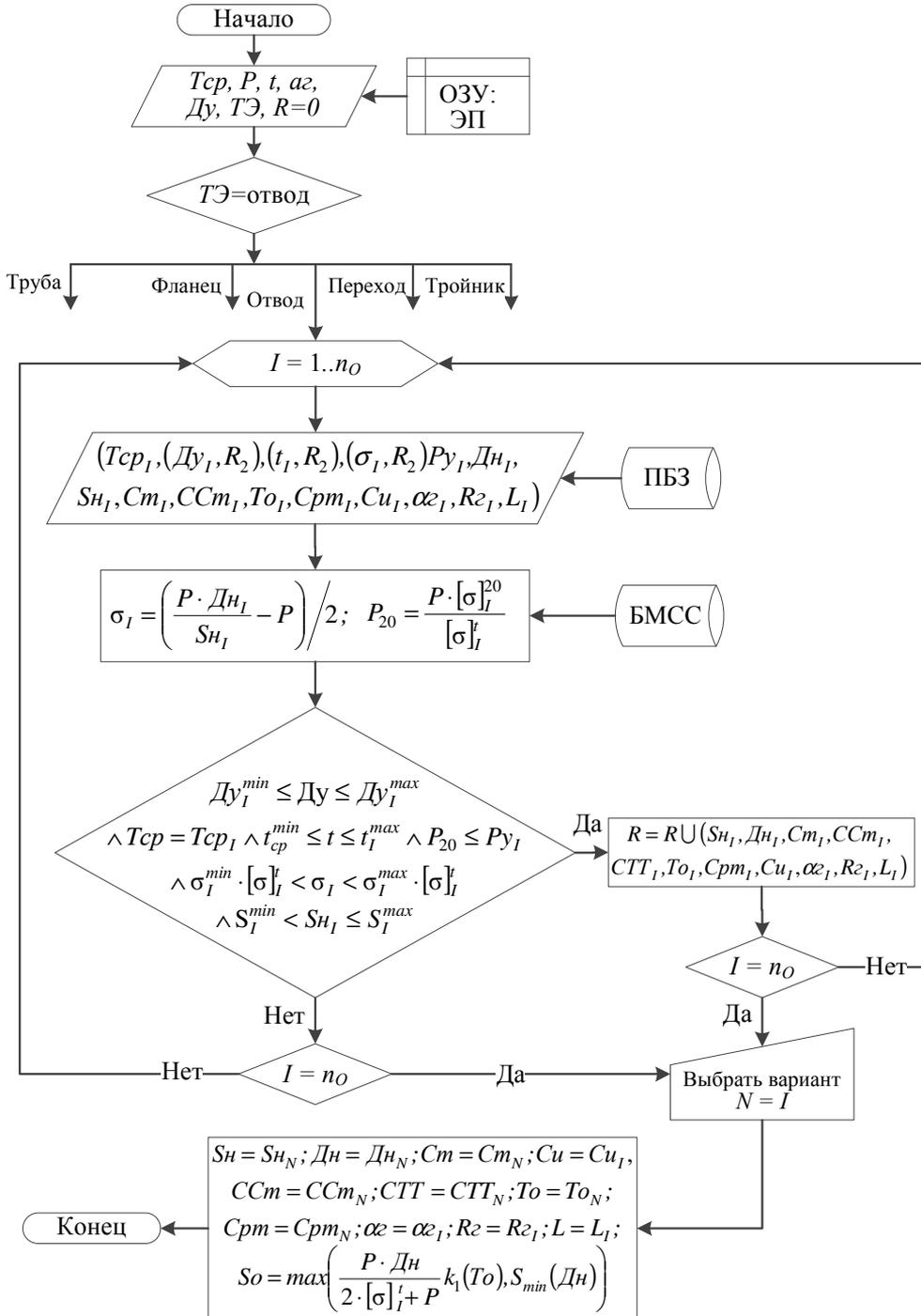


Рис. 2. Блок-схема эвристическо-вычислительного алгоритма определения характеристик элемента «отвод»

1.2. Эвристическо-вычислительные инструменты определения конструкционных характеристик элемента «переход». Переходом называется фасонная деталь трубопровода, предназначенная для герметичного соединения между собой труб разного диаметра, а также расширения или сужения потока транспортируемого вещества.

В результате анализа НТД и существующих типов конструкций (рис. 3) установлено, что переходы имеют следующие характеристики: *ТП* – тип (концентрический, эксцентрический); *Ст* – марка стали (более 40 наименований); *ССт* – стандарт на сталь (более 10 наименований); *СТТ* – стандарт на технические требования (более 12 наименований); *Срт* – стандарт на сортамент (более 12 наименований); *Дуб* – диаметр условный больший (более 20 вариантов); *Дум* – диаметр условный меньший (более 20 вариантов); *Днб* – диаметр наружный больший (более 20 вариантов); *Днм* – диаметр наружный меньший (более 20 вариантов); *Сб* – номинальная толщина стенки со стороны большего диаметра (более 20 вариантов); *См* – номинальная толщина стенки со стороны меньшего диаметра (более 20 вариантов); *L* – длина (более 20 вариантов); *So* – отбраковочная толщина стенки (расчётная характеристика); *Си* – способ изготовления (бесшовные, вальцованные, лепестковые).

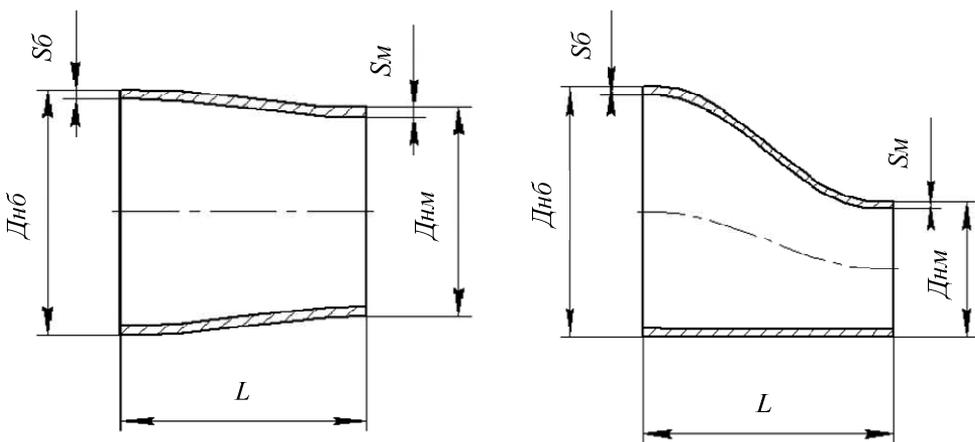


Рис. 3. Типы и геометрические характеристики переходов

Выявлено, что рекомендуемые НТД значения характеристик переходов зависят от следующих параметров: *Tcp*, *t*, *P*, *Дуб*, *Дум*.

Выражения 1 и 2 для типа элемента «переход» принимают следующий вид:

$$(Sб, Sм, Днб, Днм, L, Ст, ССт, СТТ, ТП, Срп, So) = F(Tcp, t, P, Дуб, Дум)$$

и

$$(Tcp, (Дуб, R_2), (Дум, R_2)(t, R_2), Py, Днб, Днм, Sб, Sм, L, Ст, ССт, СТТ, ТП, Си, Срп) \cap (Tcp, t, P, Дуб, Дум) \neq \{ \}$$

Примеры производственных МПЗ о конструктивных характеристиках переходов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Пример производственной модели представления знаний о переходах

| I | Дуб ^{min} | Дуб ^{max} | Дум ^{min} | Дум ^{max} | Tcp | t ^{min} | t ^{max} | Py ^{max} | Днб | Днм | Sб | Sм |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------|------------------|------------------|-------------------|-----|-----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | 10 | 300 | 10 | 300 | Дизтопливо | -40 | 475 | 10 | 273 | 159 | 10 | 6 |
| 2 | 10 | 300 | 10 | 300 | Дизтопливо | -30 | 475 | 10 | 159 | 89 | 8 | 6 |
| 3 | 10 | 300 | 10 | 300 | Дизтопливо | -40 | 475 | 10 | 108 | 89 | 6 | 6 |

Окончание табл. 2

| S ^{min} | S ^{max} | Ст | ССт | СТТ | ТП | Си | Срт | L |
|------------------|------------------|----|-----------|------------|-----------------|-----------|------------|-----|
| 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| 0 | 12 | 20 | ГОСТ 1050 | ГОСТ 17380 | Эксцентрический | Бесшовный | ГОСТ 17378 | 180 |
| 0 | 12 | 20 | ГОСТ 1050 | ГОСТ 17380 | Концентрический | Бесшовный | ГОСТ 17378 | 130 |
| 0 | 12 | 20 | ГОСТ 1050 | ГОСТ 17380 | Концентрический | Бесшовный | ГОСТ 17378 | 80 |

Блок-схема разработанного эвристическо-вычислительного алгоритма определения конструктивных характеристик элемента «переход» приведена на рис. 4.

Разработанный эвристическо-вычислительный алгоритм определения характеристик элемента «переход» отличается тем, что по заданным исходным значениям: условного большего *Дуб* и условного меньшего *Дум* диаметров, типа *Tcp*, температуры *t* и давления *P* рабочей среды, с помощью производственных моделей представления знаний о характеристиках ТТ, а также с помощью БМСС позволяет автоматизировать интеллектуальные процедуры принятия решений по определению соответствующих требованиям НТД характеристик конструктивного элемента «переход».

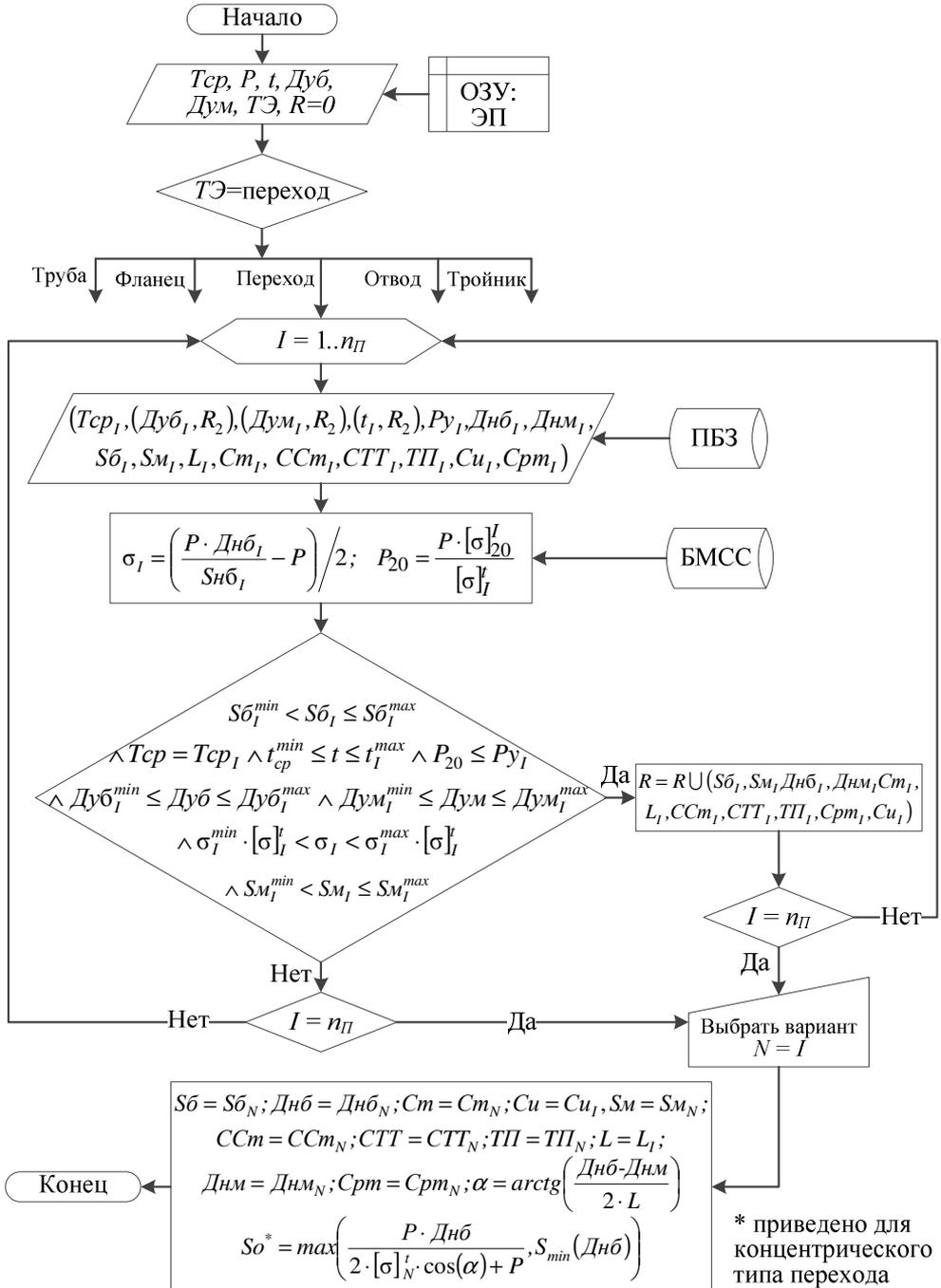


Рис. 4. Блок-схема эвристическо-вычислительного алгоритма определения характеристик элемента «переход»

1.3. Эвристическо-вычислительные инструменты определения характеристик конструкционного элемента «тройник». Тройником называется фасонная деталь трубопровода, предназначенная для слияния или деления потоков транспортируемого вещества преимущественно под углом 90 град. В результате анализа НТД и используемых на производстве конструкций (рис. 5) установлено, что тройники имеют следующие характеристики: $Дум$ – условный диаметр магистрали (более 20 вариантов); $Душ$ – условный диаметр штуцера (более 20 вариантов); $Дм$ – диаметр наружный магистрали (более 20 вариантов); $Дш$ – диаметр наружный штуцера (более 20 вариантов); $Sш$ – номинальная толщина стенки штуцера (более 20 вариантов); $Sм$ – номинальная толщина стенки магистрали (более 20 вариантов); $Sшн$ – отбраковочная толщина стенки штуцера (расчётная характеристика); $Sмн$ – отбраковочная толщина стенки магистрали (расчётная характеристика); L – длина тройника (более 20 вариантов); $Hм$ – высота тройника (более 20 вариантов).

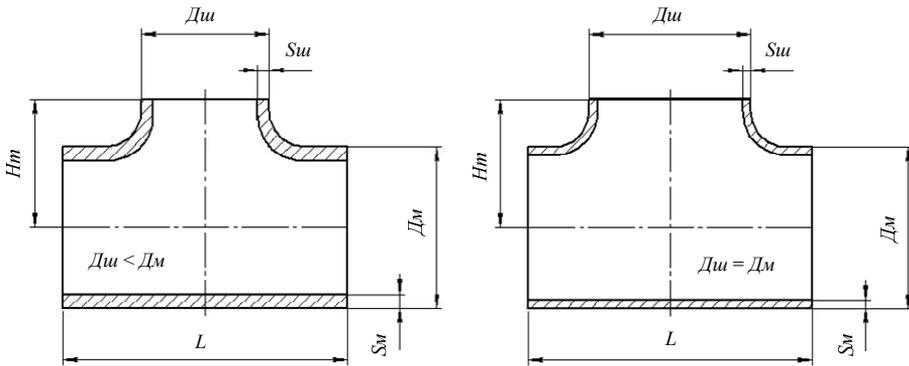


Рис. 5. Типы и геометрические характеристики тройников

Установлено, что рекомендуемые НТД значения характеристик тройников зависят от следующих параметров: $T_{ср}$, t , P , $Дум$, $Душ$.

Выражения 1 и 2 для типа элемента «тройник» принимают следующий вид:

$$(Sш, Sм, Дш, Дм, Ст, ССт, СТТ, Сш, Срт, Соо, Соош, Hм) = F(T_{ср}, t, P, Дум, Душ)$$

и

$$T_{ср}, (Дум, R_2), (Душ, R_2), (t, R_2), P, Дм, Дш, Sш, Sм, Ст, L, H, ССт, СТТ, Сш, Срт) \cap (T_{ср}, t, P, Дум, Душ) \neq \{ \}$$

Примеры производственных МПЗ о конструктивных характеристиках тройников приведены в табл. 3.

Таблица 3

Пример производственной модели представления знаний о тройниках

| I | Tcp | Dym ^{min} | Dym ^{max} | Dush ^{min} | Dush ^{max} | t ^{min} | t ^{max} | Py | Дм | Дш | Sш | Sm |
|---|------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|----|-----|-----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | Дизтопливо | 10 | 300 | 10 | 300 | -40 | 475 | 10 | 219 | 219 | 8 | 8 |
| 2 | Дизтопливо | 10 | 300 | 10 | 300 | -30 | 475 | 10 | 159 | 108 | 6 | 8 |
| 3 | Дизтопливо | 10 | 300 | 10 | 300 | -40 | 475 | 10 | 273 | 219 | 6 | 7 |

Окончание табл. 3

| S ^{min} | S ^{max} | Ст | L | Нт | Си | Срт | ССт | СТТ |
|------------------|------------------|----|-----|-----|-----------|--------------|-----------|--------------|
| 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| 0 | 12 | 20 | 320 | 140 | Бесшовный | ГОСТ 17376 | ГОСТ 1050 | ГОСТ 17380 |
| 0 | 12 | 20 | 320 | 190 | Сварной | ОСТ 36-46-81 | ГОСТ 1050 | ОСТ 36-49-81 |
| 0 | 12 | 10 | 380 | 175 | Бесшовный | ГОСТ 17376 | ГОСТ 1050 | ГОСТ 17380 |

Блок-схема эвристическо-вычислительного алгоритма определения конструктивных характеристик элемента «тройник» приведена на рис. 6, где ϕ_d – коэффициент прочности тройника, ослабленного отверстием.

Разработанный эвристическо-вычислительный алгоритм определения характеристик элемента «тройник» отличается тем, что по заданным исходным значениям условных диаметров магистрали $D_{ум}$ и штуцера $D_{уш}$, типа T_{cp} , температуры t и давления P рабочей среды с помощью производственных моделей представления знаний о характеристиках ТТ, а также с помощью БМСС позволяет автоматизировать интеллектуальные процедуры принятия решений по определению соответствующих требованиям НТД характеристик конструктивного элемента «тройник».

2. Эвристическо-вычислительные инструменты действующих технологических трубопроводов. Анализ процесса ИЛП эксплуатируемых или действующих технологических трубопроводов показал, что разработка ЭВИ востребована при выполнении следующих процедур:

- определение периода ревизий;
- определение недостающих и исправление ошибочно вписанных значений характеристик конструктивных элементов трубопровода;
- проверка характеристик трубопровода на соответствие требованиям НТД;
- определение характеристик ремонтируемых сварных соединений.

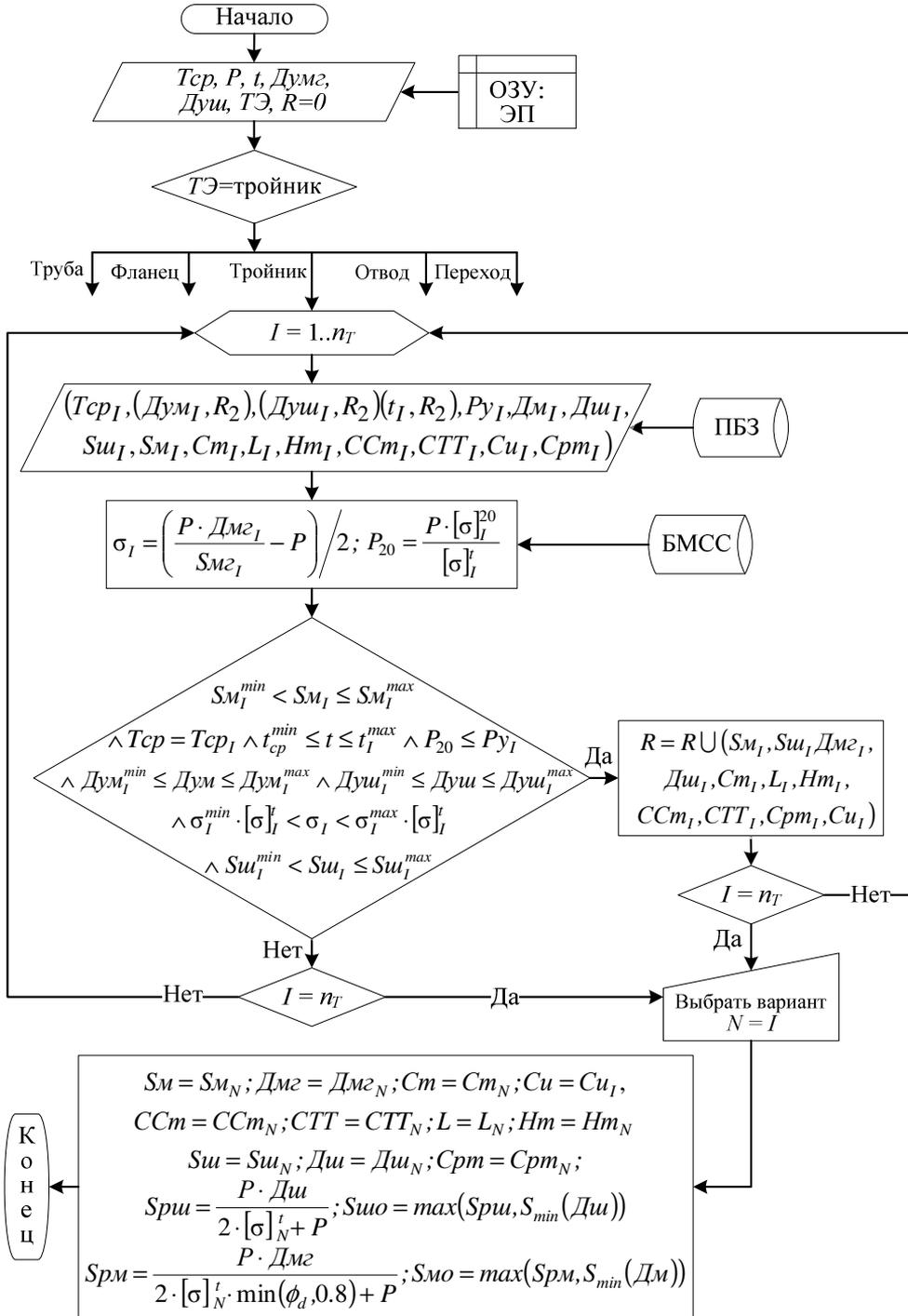


Рис. 6. Блок-схема эвристическо-вычислительного алгоритма определения характеристик элемента «тройник»

Ниже рассмотрен результат разработки эвристическо-вычислительных инструментов в виде продукционных правил и эвристическо-вычислительных алгоритмов, позволяющих автоматизировать определение недостающих в паспортно-технической документации конструкционных характеристик элементов трубопровода. Актуальность разработки указанных инструментов обусловлена наличием на практике ситуаций неудовлетворительного ведения документации, например, следующих: приведённое в документации значение номинальной толщины стенки элемента использовано со ссылкой на стандарт, в котором этого значения нет; не указан или неправильно указан стандарт на марку стали; вместо стандарта на технические требования указан стандарт на сортамент или наоборот.

Основной причиной неудовлетворительного ведения документации в большинстве случаев является плохая организация документооборота между проектными, монтажными и эксплуатационными организациями. Следствием неудовлетворительного ведения документов является низкое качество ИЛП технологических трубопроводов, а, следовательно, низкие значения показателей экономической эффективности и промышленной безопасности нефтехимических предприятий в целом. Полноценное исправление паспортно-технической документации требует анализа большого количества первичных нормативно-технических источников, поэтому выполнение этой задачи некомпьютеризированными методами в условиях действующего производства практически нереально.

Анализ конструкционных характеристик элементов, выполненный в соответствии с принципами системного подхода, показал, что процедуру исправления и определения информации во многих случаях можно автоматизировать, разработав систему взаимосвязанных нормативных списков с характеристиками конструкционных элементов трубопроводов. Сущность предлагаемого подхода заключается в том, что для каждого конструкционного элемента создаётся массив отношений или строк нормативных характеристик, представляющий собой продукционную МПЗ об элементе трубопровода, далее в этом массиве автоматически ищутся строки, в которых существуют совпадения с известными характеристиками элементов. Если строка с совпадающими характеристиками находится только одна, то по ней автоматически

определяются значения неизвестных характеристик, если более одной, то радикально уменьшается количество допустимых вариантов ответа, что тоже важно. Пример производственной МПЗ об элементе трубопровода «труба» приведён в табл. 4.

Таблица 4

Пример производственной модели представления знаний
об элементе «труба»

| I | Сталь (<i>Cm</i>) | Стандарт на сталь (<i>CCm</i>) | Стандарт на технические требования (<i>CTT</i>) | Стандарт на сортамент (<i>Cpm</i>) | Тип труб (<i>Tmp</i>) |
|---|---------------------|----------------------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 20 | ГОСТ 1050 | ГОСТ 8731 | ГОСТ 8732 | Бесшовный |
| 2 | 15X5M | ГОСТ 20072 | ГОСТ 550 | ГОСТ 550 | Бесшовный |
| 3 | 12X18H10T | ГОСТ 5632 | ГОСТ 11068 | ГОСТ 11068 | Электросварная прямошовная |
| 4 | 17ГС | ГОСТ 19281 | ГОСТ 20295 | ГОСТ 20295 | Электросварная спиральношовная |
| 5 | 20 | ГОСТ 1050 | ГОСТ 8733 | ГОСТ 8734 | Бесшовный |

Окончание табл. 4

| Группа труб (<i>Гm</i>) | Марка труб (<i>Mt</i>) | Диаметр наружный (<i>Дn</i>), мм | Номинальная толщина стенки (<i>Sn</i>), мм | Плотность стали (<i>RoC</i>), кг/м ³ |
|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|--|---|
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| В | В-159х6 | 159 | 6 | 7859 |
| А | А-108х5 | 108 | 5 | 7750 |
| – | 89х4 | 89 | 4 | 7900 |
| – | 2-530х10 | 530 | 10 | 7850 |
| В | В-108х6 | 108 | 6 | 7859 |

В соответствии с данными табл. 4 отношение нормативных характеристик для элемента «труба» запишется в виде следующего выражения:

$$Rm = (Cm, CCm, CTT, Cpm, Tmp, Гm, Mt, Дn, Sn, RoC) \quad (3)$$

Эвристически-вычислительный алгоритм определения неизвестных характеристик конструктивных элементов трубопровода, разработанный с помощью выражения (3) для элемента «труба», приведён на рис. 7. Алгоритм отличается тем, что по известным значениям характеристик конструктивного элемента «труба» с помощью производственной базы знаний позволяет автоматически определять неизвестные значения его характеристик, соответствующих требованиям НТД.

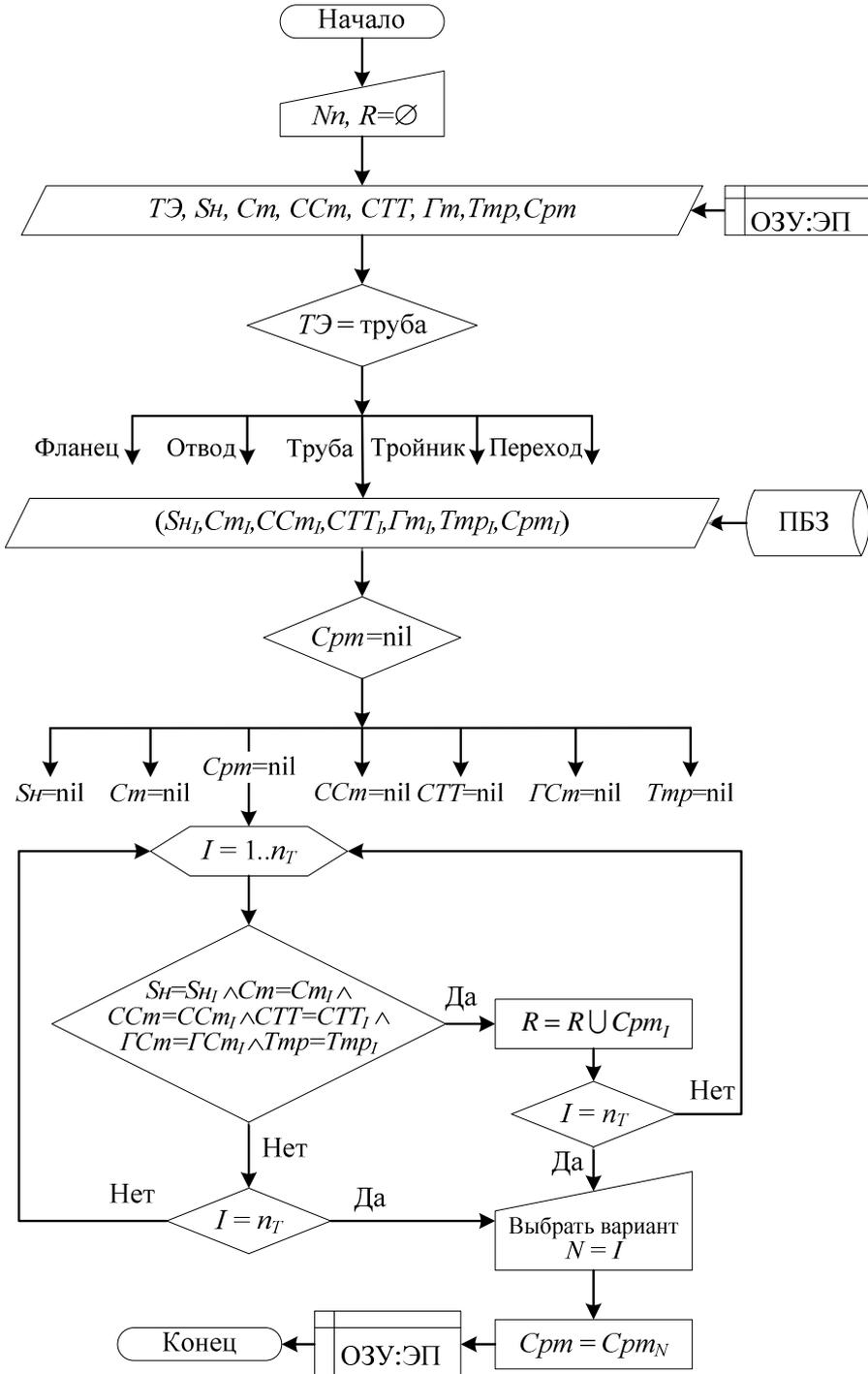


Рис. 7. Блок-схема алгоритма определения неизвестных характеристик конструкционного элемента «труба»

Выводы. Определены недостатки существующего способа ведения ИЛП технологических трубопроводов предприятий нефтехимического комплекса. По результатам анализа состояния научных исследований по ИЛП в различных отраслях промышленности показано, что устранить указанные недостатки можно, применив ЭВИ, разработанные с использованием системного подхода, теории искусственного интеллекта, логистики ресурсосбережения в сфере организации производства, а также концепций интегрированной информационной среды.

В процессе систематизации правил выбора и расчёта характеристик различных конструкционных элементов установлено, что зависимость между искомыми характеристиками элементов и определяющими их значения входными параметрами ТТ имеет дискретный характер и может быть представлена выражением (1).

Разработаны и приведены примеры ЭВИ в виде продукционных моделей представления знаний и эвристическо-вычислительных алгоритмов, которые позволяют автоматизировать процедуры определения исходных характеристик конструкционных элементов для проектируемых и неизвестных характеристик конструкционных элементов для действующих технологических трубопроводов.

Библиографический список

1. Мешалкин В.П., Дли М.И. Логистика и управление конкурентоспособностью предприятий нефтехимического комплекса. – М.: Химия, 2010. – 452 с.
2. Мешалкин В.П. Логистика и электронная экономика в условиях перехода к устойчивому развитию. – Москва-Генуя: Изд-во РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. – 573 с.
3. Мошев Е.Р. Модели и алгоритмы интегрированной логистической поддержки проектируемых технологических трубопроводов // Прикладная информатика. – 2013. – № 6. – С. 24–44.
4. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
5. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Проектирование и расчёт оптимальных систем технологических трубопроводов. – М.: Химия, 1991. – 362 с.
6. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перов В.Л. Математические основы автоматизированного проектирования химических производств. – М.: Химия, 1979. – 318 с.

7. Башмаков А.И., Башмаков И.А. Интеллектуальные информационные технологии: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 304 с.

8. Системы искусственного интеллекта в мехатронике: учебное пособие / А.А. Большаков, М.Б. Бровкова, В.П. Глазков, И.В. Егоров, В.В. Лобанов, В.Ю. Мусатов, Д.Ю. Петров, Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, С.В. Пчелинцева, В.В. Сысоев; под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2014. – 235 с.

9. Метод интеллектуального управления информационными ресурсами промышленного предприятия / М.И. Дли, О.В. Стоянова, И.В. Абраменкова, О.В. Зайцев // Прикладная информатика. – 2010. – № 5. – С. 13–22.

10. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.

11. ГОСТ Р 53394–2009. Интегрированная логистическая поддержка. Основные термины и определения. (Введ. 14.09.09). – М.: Стандартиформ, 2010. – 23 с.

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

13. Информационная поддержка жизненного цикла изделий машиностроения: принципы, системы и технологии CALS/ИПИ / А.Н. Ковшов, Ю.Ф. Назаров, И.М. Ибрагимов, А.Д. Никифоров. – М.: Академия, 2007. – 304 с.

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

15. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий (CALS-технологии). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.

16. Технологии интегрированной логистической поддержки изделий машиностроения / Е.В. Судов, А.И. Левин, А.В. Петров, Е.В. Чубарова. – М.: Информбюро, 2006. – 232 с.

17. Емельянов С.Г. Управление техническим документооборотом на основе CALS-технологий. – М.: Славянская школа, 2005. – 295 с.

18. Эвристическо-вычислительные инструменты компьютеризированной интегрированной логистической поддержки промышленных трубопроводных систем / Е.Р. Мошев, В.П. Мешалкин, Р.А. Кантюков, Р.К. Гимранов // Прикладная информатика. – 2015. – № 2. – С. 110–120.

19. 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, 24–26 мая 1989. – Новочеркасск, 1989. – С. 124–125.

20. Частиков А.П., Гаврилова Т.А., Белов Д.Л. Разработка экспертных систем. Среда CLIPS. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 608 с.

References

1. Meshalkin V.P., Dli M.I. Logistika i upravlenie konkurentosposobnost'iu predpriatii neftekhimicheskogo kompleksa [Logistics and management of competitiveness of enterprises of petrochemical complex]. Moscow: Khimiia, 2010. 452 p.

2. Meshalkin V.P. Logistika i elektronnaia ekonomika v usloviakh perekhoda k ustoiчивому razvitiu [Logistics and e-economy in conditions of transition to sustainable development]. Moscow-Genuia: Rossiiskii khimiko-tekhnologicheskii universitet imeni D.I. Mendeleeva, 2004. 573 p.

3. Moshev E.R. Modeli i algoritmy integrirovannoi logisticheskoi podderzhki proektiruemykh tekhnologicheskikh truboprovodov [Models and algorithms of integrated logistics support of projected technological pipelines]. *Prikladnaia informatika*, 2013, no. 6, pp. 24-44.

4. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Analiz i sintez khimiko-tekhnologicheskikh sistem [Analysis and synthesis of chemical-technological systems]. Moscow: Khimiia, 1991. 432 p.

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

6. Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Perov V.L. Matematicheskie osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniia khimicheskikh proizvodstv [Mathematical foundations of computer-aided design of chemical productions]. Moscow: Khimiia, 1979. 318 p.

7. Bashmakov A.I., Bashmakov I.A. Intellektual'nye informatsionnye tekhnologii [Intelligent information technology]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2005. 304 p.

8. Bol'shakov A.A., Brovkova M.B., Glazkov V.P., Egorov I.V., Lobanov V.V., Musatov V.Iu., Petrov D.Iu., Poliakhov N.D., Prikhod'ko I.A., Pchelintseva S.V., Sysoev V.V. Sistemy iskusstvennogo intellekta v mekhatronike [Artificial intelligence systems in mechatronics]. Ed. A.A. Bol'shakov. Saratov: Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2014. 235 p.

9. Dli M.I., Stoianova O.V., Abramenkova I.V., Zaitsev O.V. Metod intellektual'nogo upravleniia informatsionnymi resursami promyshlennogo predpriiatiia [Predictive management of information resources of the industrial enterprise]. *Prikladnaia informatika*, 2010, no. 5, pp. 13-22.

10. Rassel S., Norvig P. Iskusstvennyi intellekt: sovremennyi podkhod [*Artificial Intelligence: a Modern Approach*]. 2nd ed. Moscow: Vil'iams, 2006. 1408 p.

11. GOST R 53394-2009. Integrirovannaia logisticheskaia podderzhka. Osnovnye terminy i opredeleniia. (Vved. 14.09.09) [State Standard R 53394-2009. The integrated logistic support. Basic terms and definitions]. Moscow: Standartinform, 2010. 23 p.

12. Egorov A.F., Savitskaia T.V. Upravlenie bezopasnost'iu khimicheskikh proizvodstv na osnove novykh informatsionnykh tekhnologii [Security management of chemical plants based on new information technologies]. Moscow: Khimiia: KolosS, 2004. 416 p.

13. Kovshov A.N., Nazarov Iu.F., Ibragimov I.M., Nikiforov A.D. Informatsionnaia podderzhka zhiznennogo tsikla izdelii mashinostroeniia: printsipy, sistemy i tekhnologii CALS/IPI [Information support of product life cycle engineering: concepts, systems and technologies CALS/IAS]. Moscow: Akademiia, 2007. 304 p.

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

15. Norenkov I.P., Kuz'mik P.K. Informatsionnaia podderzhka naukoemkikh izdelii (CALs-tekhnologii) [Information support of science intensive products (CALs-technologies)]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2002. 320 p.

16. Sudov E.V., Levin A.I., Petrov A.V., Chubarova E.V. Tekhnologii integrirovannoi logisticheskoi podderzhki izdelii mashinostroeniia [Technology integrated logistics support of engineering products]. Moscow: Informbiuro, 2006. 232 p.

17. Emel'ianov S.G. Upravlenie tekhnicheskim dokumentooborotom na osnove CALs-tekhnologii [Management of technical document circulation on the basis of CALs-technologies]. Moscow: Slavianskaia shkola, 2005. 295 p.

18. Moshev E.R., Meshalkin V.P., Kantiukov R.A., Gimranov R.K. Evristicheskoye vychislitel'nye instrumenty komp'yuterizirovannoi integrirovannoye

noi logisticheskoi podderzhki promyshlennykh truboprovodnykh sistem [Heuristic-computational tools computerized integrated logistics support of industrial piping systems]. *Prikladnaia informatika*, 2015, no. 2, pp. 110-120.

19. Meshalkin V.P., Shubin I.A. Produktsionnaia model' optimal'noi trassirovki sistem tekhnologicheskikh truboprovodov [A production model of optimal tracing of process piping system]. *Matematicheskie metody v khimii (MMKh-6-89): materialy IV Vsesoiuznoi konferentsii; Novocherkassk, 24-26 May 1989*. Novocherkassk, 1989, pp. 124-125.

20. Chastikov A.P., Gavrilova T.A., Belov D.L. Razrabotka ekspertnykh sistem. Sreda CLIPS [The development of expert systems. Software environment CLIPS]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2003. 608 p.

Сведения об авторах

Мошев Евгений Рудольфович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Машины и аппараты производственных процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: erm@pstu.ru).

Мешалкин Валерий Павлович (Москва, Россия) доктор технических наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой «Логистика и экономическая информатика» Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева (125047, Москва, Миусская пл., 9, e-mail: clogist@muctr.ru).

About the authors

Moshev Evgeniy Rudolfovich (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of machines and apparatus of production processes Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: erm@pstu.ru).

Meshalkin Valery Pavlovich (Moscow, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, academician of RAS, head of the Department of logistics and economic Informatics, D.I. Mendeleev Russian University of chemical technology (125047, Moscow, 9, Miusskaya square, e-mail: clogist@muctr.ru).

Получено 09.07.2018