

## СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-ЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

**В.Г. Мокрозуб, С.В. Морозов**

*Кафедра «Автоматизированное проектирование технологического оборудования»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; mokrozubv@yandex.ru*

**Ключевые слова и фразы:** автоматизация; автоматизированная информационная система; конструкция; структура; технология изготовления; транспортировка.

**Аннотация:** Представлена структура информационно-логической модели кожухотрубчатых теплообменников, состоящая из модели определения структуры, параметров, конструкции, транспортировки и технологии изготовления теплообменника.

---

Кожухотрубные теплообменные аппараты (**КТА**) относятся к наиболее распространенным аппаратам в химической и пищевой промышленности. Их применяют для проведения теплообмена и термохимических процессов между различными жидкостями, парами и газами как без изменения, так и с изменением их агрегатного состояния.

В настоящее время существуют разнообразные автоматизированные информационные системы (**АИС**), предназначенные для автоматизации конструирования технологического оборудования, в том числе и теплообменных аппаратов. В источниках описываются программы для технологического расчета [1], механических расчетов теплообменных аппаратов [2, 3], подбора теплообменного оборудования [4], оценки приведенных затрат при проектировании теплообменников типа «труба-в-трубе» [5]. Все указанные программные продукты позволяют автоматизировать лишь определенный этап разработки технической документации теплообменного оборудования.

Описывается методология разработки интеллектуальной АИС (**ИАИС**), позволяющей автоматизировать разработку технической документации объекта на всех этапах конструирования с минимальным участием лица, принимающего решение (**ЛПР**) [5, 6]. Основой предлагаемой методологии является информационно-логическая модель (**ИЛМ**), описывающая конструируемый объект на разных этапах абстрагирования. Структура обобщенной ИЛМ представлена в источнике [7].

В качестве примера в [5, 6] рассматривается емкостный аппарат с перемещающим устройством. В предлагаемой статье представлена структура ИЛМ КТА [7], учитывающая:

- 1) способ транспортировки изготовленного аппарата к месту его установки;
- 2) особенности конструктивного исполнения КТА;
- 3) получение технологии изготовления его отдельных элементов.

Разработка технической документации, предназначенной для изготовления КТА, включает в себя этапы:

- 1) определение типа и структуры аппарата;
- 2) технологические расчеты;

- 3) разработку конструкции;
- 4) определение способа транспортировки;
- 5) получение технологии изготовления.

Несмотря на некоторые различия в конструкции КТА (материалы элементов, способы закрепления труб в трубных решетках, наличие или отсутствие перегородок, противобайпасных устройств и др.), они имеют общую структуру.

Кожухотрубные теплообменные аппараты состоят из пучков труб, укрепленных в трубных решетках; кожухов; крышек; камер; патрубков и опор. Трубное и межтрубное пространства в этих аппаратах разобщены, причем каждое из них может быть разделено перегородками на несколько ходов. Эти аппараты изготавливают следующих типов: с неподвижными трубными решетками; температурным компенсатором на кожухе; плавающей головкой; U-образными трубами; плавающей головкой с компенсатором и без компенсатора на ней.

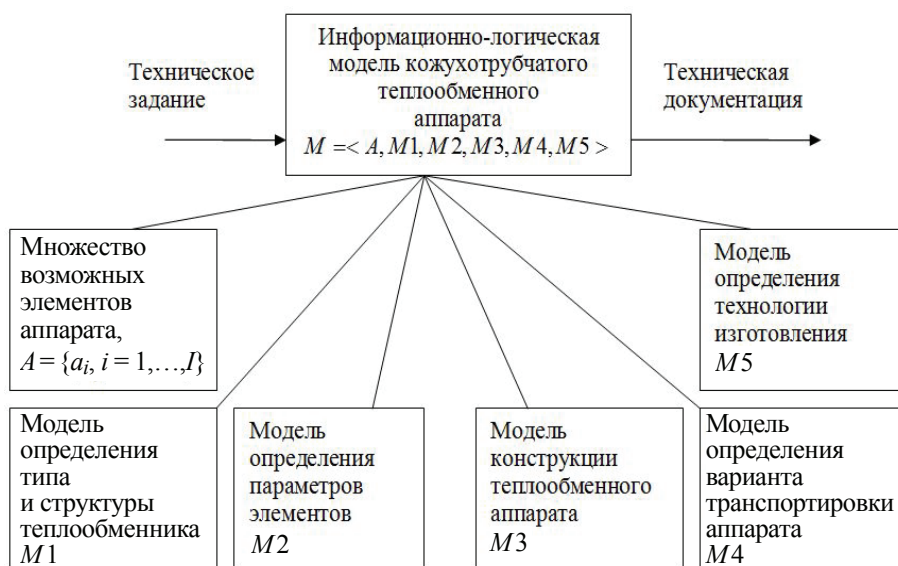
Исходные данные для разработки технической документации КТА представлены в техническом задании (ТЗ), где отражены температура и свойства теплоносителей, условия взаимодействия с окружающей средой и др.

В соответствии с этапами разработки ИЛМ КТА можно представить в виде (рис. 1):

$$M = \langle A, M1, M2, M3, M4, M5 \rangle,$$

где  $A = \{a_i, i = 1, \dots, I\}$  – множество возможных элементов аппарата;  $M1$  – модель определения типа и структуры теплообменного аппарата;  $M2$  – модель определения параметров элементов;  $M3$  – модель конструкции КТА, то есть определения положения элементов в пространстве;  $M4$  – модель определения варианта транспортировки аппарата;  $M5$  – модель определения технологии изготовления.

Примеры возможных элементов КТА: обечайка, днище, штуцер, опоры, трубные решетки и др. Каждый элемент  $a_i$  имеет множество свойств (параметров)  $P^i = \{p_j^i, j = 1, \dots, J^i\}$ , а каждое свойство имеет множество допустимых значений  $U^{ij} = \{u_k^{ij}, u = 1, \dots, U^{ij}\}$ .



**Рис. 1. Структура информационно-логическая модель кожухотрубчатого теплообменного аппарата**

**Модель определения типа и структуры** теплообменного аппарата  $M1$  обеспечивает выбор из существующих конструкций теплообменных аппаратов, причем только тех, которые необходимы для достижения заданных свойств теплообменника. При помощи модели структуры  $M1$  решаются следующие задачи:

- выделение из множества возможных функциональных элементов теплообменного оборудования  $A$  некоторого подмножества функциональных элементов  $A^r = \{a_r, r \in 1, \dots, I\}$ ,  $A^r \subset A$ , принадлежащих конкретному проектируемому аппарату, согласно выбранному типу теплообменника;
- определение типа для каждого элемента  $a_r$ ;
- определение способа соединения элементов  $a_r$ ;
- определение множества соединительных элементов  $A^s = \{a_s, s \in 1, \dots, I\}$ ,  $A^s \subset A$ , проектируемого теплообменного аппарата на основании способа соединения элементов  $a_r$ .

Модель типа и структуры можно представить кортежем

$$M1 = \langle A, P^r, P^t, P^s \rangle,$$

где  $P^r$  – правила, определяющие наличие функциональных элементов аппарата, например, если тип теплообменника горизонтальный с линзовым компенсатором, то необходимо наличие штуцера для слива жидкости из компенсатора;  $P^t$  – правила, определяющие тип теплообменного аппарата, например, если высота ограничена, то тип корпуса – горизонтальный;  $P^s$  – правила, определяющие типы соединительных элементов технического объекта, например, если подключение трубопровода разъемное, то должно быть фланцевое соединение.

**Модель определения параметров элементов  $M2$**  служит для получения размеров элементов, входящих в аппарат, и конструктивных свойств, таких как материал, конструктивное исполнение и т.д. Размеры элементов КТА можно разделить на три типа [10]:

- а) определяющие размеры, зависящие от параметров процессов, для которых предназначен проектируемый технический объект (**ТО**) (а-размеры);
- б) размеры, зависящие от размеров других элементов ТО (единичные параметры [9]), например внутренний диаметр приварного встык фланца аппарата равен внутреннему диаметру корпуса (б-размеры);
- в) размеры, зависящие от других размеров этого же элемента (унитарные параметры [9]), например, все размеры стандартного фланца аппарата зависят от его внутреннего диаметра и давления в аппарате (в-размеры).

Модель определения параметров элементов можно представить кортежем

$$M2 = \langle A, P^b, P^{pp}, P^{pe} \rangle,$$

где  $P^b, P^{pp}, P^{pe}$  – правила и зависимости для определения а-размеров, единичных и унитарных параметров элементов соответственно.

Пример правила  $P^b$ : «Если – Давление  $> 0,07$ МПа И среда взрывоопасная или пожароопасная, то аппарат первой группы».

В зависимости от результата выполнения данных правил находятся свойства и характеристики аппарата и его элементов, которые представлены группой оборудования – уплотнительными поверхностями фланцев, объемом контроля сварных соединений и т.д.

Правила  $P^{pp}$  необходимы для определения размеров элементов, отсутствующих в нормативах и стандартах, и определяются после выполнения технологических расчетов. Например, внутренний диаметр аппарата находится и при-

сваивается всем связанным между собой элементам корпуса: обечайке, днищу, корпусным фланцам. А согласно определенному расходу среды подбираются фланцы входных и выходных штуцеров. Рассмотрим правила и зависимости  $P^{PP}$  на примере определения параметров обечайки, фланца и двух привариваемых к обечайке штуцеров (рис. 2). Будем использовать принятую в объектном программировании нотацию «объект.свойство». Исходными данными являются: диаметр обечайки  $D$ , давление в аппарате  $P$  и материал изготовления элементов, который описывается вектором свойств материала  $mat$ .

обечайка.S =  $F_s(\text{обечайка.D}, mat)$ ,

фланец\_аппарата.D = обечайка.D

днище.D = обечайка.D

днище.S = обечайка.S

Если обечайка.S  $\leq 8$ , то штуцер.S = обечайка.S

Если обечайка.S  $> 8$  И обечайка.S  $< 16$ , то обечайка.S  $> 16$

Если обечайка.S  $> 16$ , то штуцер.S = обечайка.S  $\cdot 0,5$

Если обечайка.D  $\leq 400$ , то - штуцер.D = 100

Если обечайка.D  $> 400$  И обечайка.D  $< 800$ , то штуцер.D = 200

Если - обечайка.D  $> 800$ , то - штуцер.D = 100

штуцер.D<sub>нар</sub> = штуцер.D + 2  $\cdot$  штуцер.S

Если - штуцер.D<sub>нар</sub>  $< 150$ , то - отверстие.D = штуцер.D<sub>нар</sub> + 1

Если штуцер.D<sub>нар</sub>  $> 150$  И штуцер.D<sub>нар</sub>  $< 350$ , то

отверстие.D = штуцер.D<sub>нар</sub> + 2

Если - штуцер.D<sub>нар</sub>  $> 350$ , то - отверстие.D = штуцер.D<sub>нар</sub> + 3,

где  $F_s$  выражения ГОСТ Р 52857.1–2007; S – толщина обечайки.

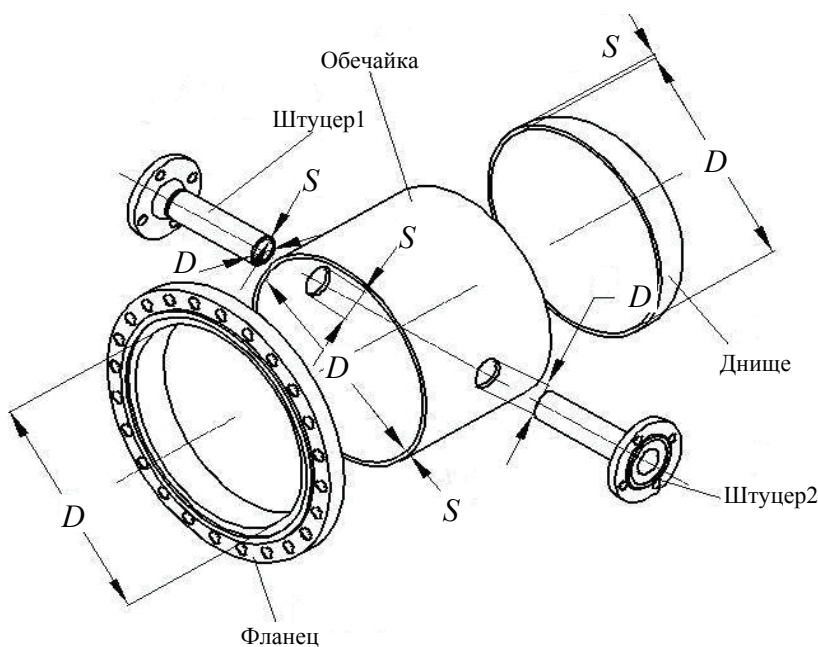


Рис. 2. Сборка с определяемыми параметрами деталей

Зависимости  $P^{pe}$  представляют собой табличную функцию в-размеров от б-размеров, так, например, для фланцев аппаратов число и диаметр отверстий под болты, диаметр болтовой окружности и др. (в-размеры) зависят от внутреннего диаметра фланца (б-размер) и давления и выбираются с помощью стандарта ГОСТ 28759.3–90 [12].

**Модель конструкции теплообменного аппарата** используется при нахождении всех параметров элементов, то есть когда можно осуществить сборку и однозначно определить позиции элементов относительно друг друга.

Любой твердотельный геометрический объект характеризуется кортежем:  $A^{3D} = \langle Os, L, Gr, S^P \rangle$ , где  $Os = \{os\}$  – множество осей;  $L = \{l\}$  – множество ребер;  $Gr = \{gr\}$  – множество поверхностей (граней);  $S^P = \{s^P\}$  – множество сопряжений (связей позиционирования) между  $O$ ,  $L$  и  $Gr$ .

Формальное представление модели конструкции

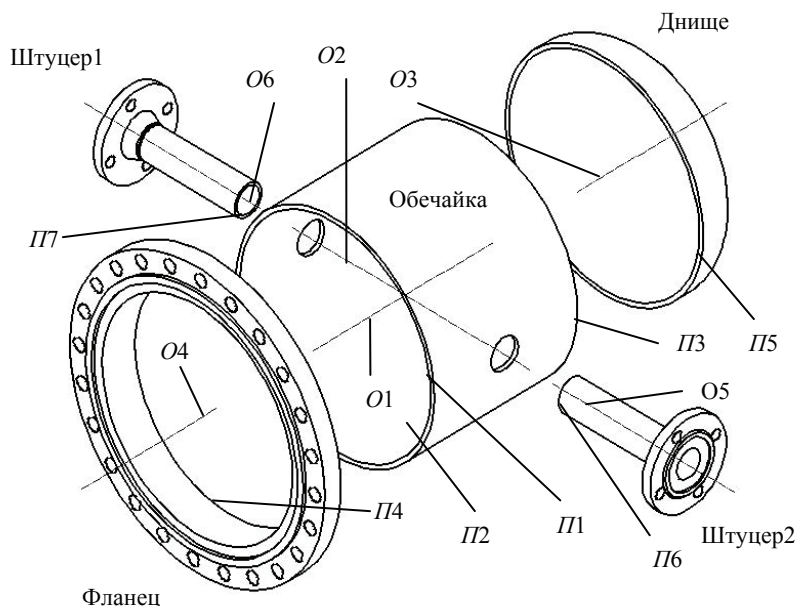
$$M3 = \langle A^{3D}, R^{SP}, B^r \rangle,$$

где  $R^{SP}$  – реестр типов сопряжений между базовыми осями, ребрами и гранями элементов;  $B^r$  – правила, определяющие сопряжения между базовыми геометрическими параметрами элементов.

Модель конструкции (рис. 3) можно представить как:

Днище .O3  $\odot$  Обечайка .O1, Крышка .П5  $\cap$  Обечайка .П3,  
 Фланец .O4  $\odot$  Обечайка .O1, Фланец .П4  $\cap$  Обечайка .П1,  
 Штуцер1 .O5  $\odot$  Обечайка .O2, Штуцер2 .П6  $\cap$  Обечайка .П2,  
 Штуцер1 .O6  $\odot$  Обечайка .O2, Штуцер2 .П7  $\cap$  Обечайка .П2,

где  $\odot$  – соосность;  $\cap$  – расположение в одной плоскости.



**Рис. 3. Элементы сопряжения деталей теплообменника**

**Модель определения варианта транспортировки аппарата** позволяет определить способ транспортировки изготовленного аппарата потребителю, который оказывает значительное влияние на конечную стоимость изделия. От способа транспортировки зависят такие параметры, как схема погрузки, упаковка, способ закрепления, необходимость согласования с транспортными ведомствами и др.

Модель транспортировки аппарата  $M2$  можно представить в виде

$$M4 = \langle V^g, V^d, V^a \rangle,$$

где  $V^g, V^d, V^a$  – правила, определяющие возможность транспортировки аппарата железнодорожным транспортом, автотранспортом и водными путями соответственно.

Так как способ транспортировки аппарата определяется техническим заданием, результатом выполнения модели транспортировки аппарата является набор правил, которые выступают ограничениями в модели конструкции теплообменника и модели определения параметров элементов теплообменного аппарата. Для железнодорожного способа транспортировки их можно представить как:

Степень негабаритности 1:  $H_{\max} < 3250$  – наилучший вариант;

степень негабаритности 2:  $3250 < H_{\max} < 3400$  – допустимо.

Степень негабаритности 3:  $3400 < H_{\max} < 3600$  – допустимо.

Степень негабаритности 4:  $3600 < H_{\max} < 3700$  – допустимо только с указания лица, принимающего решение.

Степень негабаритности 5:  $H_{\max} > 3700$  – недопустимо,

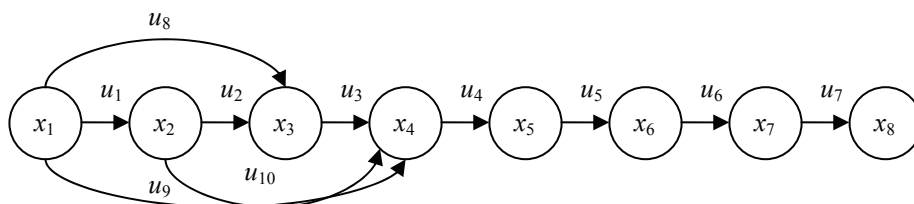
где  $H_{\max}$  – наибольший из габаритных размеров по осям  $X, Y$ .

В случае получения результатов выполнения модели транспортировки степеней негабаритности 4 или 5 необходимо проводить повторное итерационное выполнения моделей  $M1-M3$  для получения результатов, удовлетворяющих степени негабаритности 1 – 3.

**Модель определения технологии изготовления элементов.** Технология изготовления детали представляет собой последовательность операций, которая определяется конструктивными элементами детали. В кожухотрубчатом теплообменнике можно выделить группы деталей, обладающих общими конструктивными признаками: обечайки, днища, фланцы, трубы, плоские листовые детали (ребра жесткости, опорные плиты и др.), гнутые листовые детали (укрепляющие кольца, подкладные листы), трубные решетки и перегородки. Каждая из данных групп имеет свой типовой маршрут изготовления, представляющий собой ориентированный мультиграф операций:

$$L_{po} = (X, U),$$

где  $X = \{x_i\}, i = 1, \dots, I$  – вершины графа (операции);  $U = \{u_m\}, m = 1, \dots, M$  – множество ребер графа, определяющих последовательность операций.



**Рис. 4. Ориентированный мультиграф типового маршрута группы деталей «Фланец»**

Для примера рассмотрим граф типового маршрута группы деталей «Фланец» (рис. 4). Здесь  $x_1, \dots, x_8$  – операции типового маршрута  $X$  группы деталей, а именно:  $x_1$  – разметка заготовки;  $x_2$  – плазменная резка листа;  $x_3$  – токарная отрезка круга;  $x_4$  – токарная обработка заготовки;  $x_5$  – разметка болтовых отверстий;  $x_6$  – сверление болтовых отверстий;  $x_7$  – токарная обработка привалочной поверхности фланца;  $x_8$  – маркировка готового изделия согласно стандарта;  $u_1, \dots, u_{10}$  – ребра графа, а именно  $u_1 = (x_1, x_2)$ ;  $u_2 = (x_2, x_3)$ ;  $u_3 = (x_3, x_4)$ ;  $u_4 = (x_4, x_5)$ ;  $u_5 = (x_5, x_6)$ ;  $u_6 = (x_6, x_7)$ ;  $u_7 = (x_7, x_8)$ ;  $u_8 = (x_1, x_3)$ ;  $u_9 = (x_1, x_4)$ ;  $u_{10} = (x_2, x_4)$ .

Мультиграф типового маршрута содержит все возможные варианты маршрутов изготовления группы деталей. Конкретный маршрут определяется заготовкой, наличием или отсутствием дополнительных элементов (например, наличие паза для перегородки в трубной решетке) и др. Выбор однозначного маршрута осуществляется с помощью правил  $J^P = \{J_i\}, i = 1, \dots, n$ .

Например для маршрута изготовления фланца (см. рис. 4) правила имеют вид:

$J_1$  – Если Фланец.Тип=плоский, то ребро  $u_1$ ;

$J_2$  – Если Фланец.Тип=плоский, то ребро  $u_{10}$ ;

$J_3$  – Если Фланец.Тип=приварной встык И Заготовка.Сортамент=Круг, то ребро  $u_8$ ;

$J_4$  – Если Фланец.Тип=приварной встык И Заготовка.Сортамент=Поковка, то – ребро  $u_9$ .

Дальнейшее выполнение операций не зависит от типа фланца, заготовки, уплотнительной поверхности и т.д., и выполняется линейно для всей группы деталей.

Исходя из вышеизложенного, модель определения технологии изготовления элементов  $M5$  можно представить в виде

$$M5 = \langle L_{po}, J^P \rangle.$$

Обработка мультиграфа маршрута изготовления группы деталей для получения однозначного решения может быть осуществлена, например, как описано в источнике [11].

**Заключение.** Дано описание информационно-логической модели кожухотрубчатых теплообменников, позволяющей получать техническую документацию на разных этапах проектирования с минимальным участием человека. Модель отличается наличием правил, определяющих возможность транспортировки теплообменника и маршруты изготовления его элементов.

#### Список литературы

1. ТЕПЛОС – программа расчета теплообменников, конденсаторов, испарителей [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.nsa-llc.ru/227/249/teplos> (дата обращения 09.02.2013). – Загл. с экрана.

2. PVP Design пакет прикладных программ расчета на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов, работающих под давлением [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://aistsoft.ru/obzor/truboprowod/pvp\\_price.htm](http://aistsoft.ru/obzor/truboprowod/pvp_price.htm) (дата обращения 09.02.2013). – Загл. с экрана.

3. Малинин, А.В. «АЛЬФА ТЕХНОЛОГИЯ» – первый шаг к оптимальному выбору теплообменного оборудования / А.В. Малинин, С.Н. Донин // Хим. техника. – 2011. – № 12. – С. 14–18.
4. Мокрозуб, В.Г. Виртуальный кабинет «Конструирование технологического оборудования» / В.Г. Мокрозуб, А.А. Борисьяк, Е.С. Егоров // Наука и образование : электрон. науч. издание. – 2011. – № 10. – Режим доступа : <http://technomag.edu.ru/doc/227902.html> (дата обращения 08.02.2013). – Загл. с экрана.
5. Мокрозуб, В.Г. Методологические основы построения автоматизированной информационной системы проектирования технологического оборудования / В.Г. Мокрозуб, М.П. Мариковская, В.Е. Красильников // Системы управления и информ. технологии. – 2007. – № 1.2(27). – С. 259–262.
6. Мокрозуб, В.Г. Интеллектуальная автоматизированная информационная система проектирования химического оборудования / В.Г. Мокрозуб, В.Е. Красильников, М.П. Мариковская // Системы управления и информ. технологии. – 2007. – № 4.2(30). – С. 264–267.
7. Мокрозуб, В.Г. Информационно-логические модели технических объектов и их представление в информационных системах / В.Г. Мокрозуб, В.А. Немтинов, С.Я. Егоров // Информ. технологии в проектировании и пр-ве. – 2010. – № 3. – С. 68–73.
8. Борисенко, А.Б. Оценка приведенных затрат при проектировании теплообменников типа «труба-в-трубе» / А.Б. Борисенко, С.В. Карпушкин, Р.Р. Хуснутдинов // Информ. системы и технологии. – 2012. – № 4. – С. 24–30.
9. Павлов, В.В. Структурное моделирование в CALS-технологиях / В.В. Павлов ; отв. ред. Ю. М. Соломенцев ; Ин-т конструкторско-технолог. информатики РАН. – М. : Наука, 2006. – 307 с.
10. Представление модели параметрического синтеза технического объекта в реляционной базе данных / В.Г. Мокрозуб [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 462–465.
11. Мокрозуб, В.Г. Применение гиперграфов и реляционной базы данных для описания структуры радиотехнических систем / В.Г. Мокрозуб, В.А. Немтинов, С.Я. Егоров, С.В. Морозов // Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. – 2009. – № 11. – С. 37–41.
12. ГОСТ 28759.3–90. Фланцы сосудов и аппаратов стальные приварные встык. Конструкция и размеры. – Введ. 1992-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 12 с.

---

## The Structure of Informational and Logical Model of Shell-and-Tube Heat Exchangers

V.G. Mokrozub, S.V. Morozov

*Department “Computer-Aided Design of Process Equipment”; TSTU;  
mokrozubv@yandex.ru*

**Key words and phrases:** automation; automated information system; design; manufacturing technology; structure; transportation.

**Abstract:** The paper describes the structure of the informational and logical model of shell-and-tube heat exchangers; it consists of the model of determining the structure, parameters, construction, transportation and manufacturing technology of heat exchangers.



## **Struktur des Informationslogischmodells der Rohrbündelwärmeübertrager**

**Zusammenfassung:** Es ist die Struktur des Informationslogischmodells des Rohrbündelwärmeübertragers, die aus dem Modell der Bestimmung der Struktur, der Parameter, der Konstruktion, der Beförderung und der Technologie der Herstellung des Wärmeübertragers besteht, dargelegt.

---

## **Structure du modèle logique informatique des échangeurs de chaleur à faisceau de tubes**

**Résumé:** Est présentée la structure du modèle logique informatique de l'échangeur de chaleur à faisceau de tubes qui se compose du modèle de la définition de la structure, des paramètres, de la construction, du transport et de la technologie de la fabrication de l'échangeur de chaleur.

---

**Авторы:** *Мокрозуб Владимир Григорьевич* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматизированное проектирование технологического оборудования»; *Морозов Сергей Владимирович* – аспирант кафедры «Автоматизированное проектирование технологического оборудования», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Подольский Владимир Ефимович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---