

## ПРОТОТИП ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ КОМПОНОВКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

С. Я. Егоров, К. А. Шаронин

*Кафедра «Автоматизированное проектирование технологического оборудования», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; sharonin68@gmail.com*

**Ключевые слова и фразы:** компоновка; конструкторское проектирование; математическое моделирование; экспертные знания; экспертные системы.

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы проектирования и дано описание экспертной системы компоновки промышленных объектов, позволяющей формализовать ограничения в виде системы продукционных правил. Приведены алгоритмы процедур формирования и контроля ограничений при автоматизированном проектировании компоновки промышленных объектов. Представлена программная реализация системы.

---

В современных условиях эффект от внедрения промышленного объекта зависит от оптимальности принятых проектных решений на стадии конструкторского проектирования. Поэтому существует необходимость оперативного решения задач структурного синтеза [1]. Получаемая при этом пространственная модель будущего промышленного объекта включает строительные конструкции, размещенное оборудование, сеть технологических соединений, вспомогательные оборудование и конструкции. Проектное решение на данном этапе существенно влияет на стоимость эксплуатации и должно удовлетворять ограничениям, соответствующим нормативным документам (СНиП, ПБ, ГОСТ и т.д.). Выбор ограничений зависит от технологических особенностей, условий эксплуатации проектируемых систем, работы оборудования и персонала, условий обслуживания и других факторов. К тому же, при наличии опыта, проектировщик может сам накладывать дополнительные ограничения на получаемое решение.

Математические модели и методы решения задачи компоновки описаны в работах отечественных [2 – 4] и зарубежных [5 – 8] авторов, но предложенные ими модели рассматривают только основные ограничения (такие как отсутствие пересечений объектов, соблюдение минимальных расстояний) и не предусматривают расширение системы ограничений модели. Таким образом, для автоматизированного решения задач, требующих учета дополнительных ограничений, необходима разработка новых моделей и программных комплексов либо трудоемкая модернизация существующих.

Для решения данной проблемы разработана экспертная система компоновки промышленных объектов, формирующая систему ограничений на основе экспертной информации непосредственно во время исполнения программы. Такой подход позволяет упростить адаптацию системы для автоматизированного решения задачи компоновки в различных вариантах постановки. Однако для формирования ограничений в виде, пригодном для использования в системе, требуется эксперт в области решаемой задачи (постановщик задачи) и специалист по наполнению системы (инженер по знаниям).

## Математическое обеспечение экспертной системы

Для создания автоматизированных информационных систем, предназначенных для проектирования промышленных объектов, необходимо иметь математическую модель, которая должна позволить с минимальным участием проектировщика генерировать варианты по исходным данным, определенным в техническом задании на проектирование [9].

Рассмотрим математическое обеспечение в виде комплекса взаимосвязанных блоков (рис. 1).

Модель структуры технической системы является ядром разработанного математического обеспечения. Эта модель с необходимым для проектирования компонентом уровнем детализации описывает структуру проектируемого объекта, а также свойства размещаемых объектов, технологических соединений, областей размещения.

При моделировании структуры технической системы используется  $N$ -ориентированный гиперграф в виде  $G(X, U, U^L)$ , где  $X, U$  – множества соответственно вершин и гиперребер гиперграфа;  $U^L = \{u_l^l = \langle x_{p1}; x_{p2} \rangle | l = 1, N_l\}$  – множество ребер ориентированного подграфа  $G_l(X^L, U^L)$ , задающее систему связей между объектами;  $X^L \in X$  – множество связанных объектов. Особенностью данной математической структуры является возможность задания в соответствие каждой вершине и ребру множества параметров – свойств  $S$ , например: габаритов объекта, координат его базовых точек, веса, типа и т.д. Каждое свойство для конкретного объекта принимает свое значение из множества допустимых:  $z[s_j, x_i] \in Z_{i,j}$  – значение свойства  $s_j$  объекта  $x_i$ ,  $Z_{i,j}$  – множество допустимых значений свойства  $s_j$  объекта  $x_i$ . Аналогично определяются свойства областей размещения  $z[s_j, u_m] \in Z_{m,j}$  и технологических соединений  $z[s_j, u_l] \in Z_{l,j}$  [10].

Зададим множество размещаемых объектов как множество вершин  $X$  гиперграфа  $G(X, U, U^L)$ . Через множество ребер  $U$  определим пространство компоновки (этажи, помещения, цеха). Систему технологических связей между оборудованием зададим в виде ориентированных ребер  $U^L$  подграфа  $G_l(X^L, U^L)$ , представленного матрицей инцидентности  $L$ . Таким образом,  $N$ -ориентированный гиперграф описывает структуру проектируемой технической системы.

Рассмотрим правило вида «Если  $A$ , то  $B$ », в котором  $A$  и  $B$  некоторые события. Будем называть событие  $A$  условной частью правила, а событие  $B$  следствием. Событие  $A$  и  $B$  представляют собой комбинацию ограничений вершин и ребер гиперграфа  $G(X, U, U^L)$  и подграфа  $G_l(X^L, U^L)$ .

Рассмотрим ограничение свойства объекта –  $z[s_j, x_i] \Theta z_{i,j,t}$ , где  $\Theta \in \{<, >, =, \neq, \leq, \geq\}$ ;  $z_{i,j,t}$  –  $t$ -е значение  $j$ -го свойства  $i$ -го объекта. При этом,  $z_{j,t}$  может быть как конкретным значением свойства, так и значением свойства другой вершины.

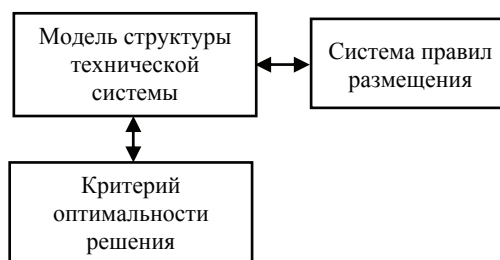


Рис. 1. Структура математического обеспечения

По аналогии элементарное ограничение свойства области имеет вид  $z[s_j, u_m] \Theta z_{m,j,t}$ . Также зададим элементарное ограничение свойства технологического соединения, как  $z[s_j, u_l] \Theta z_{l,j,t}$ .

В реальных задачах зачастую ограничивается не значение свойства, а некая функция от свойств объектов. Например, разница высоты расположения двух аппаратов, между которыми вещество передается самотеком. Тогда запишем ограничение свойств объекта как  $f(z[s_j, x_i]) \Theta z_t, \forall i = \overline{1, N_0}$ , где  $N_0$  – число объектов. Функция  $f$  является линейной функцией от значений свойств. Аналогично запишем ограничение свойств областей размещения  $f(z[s_j, u_m]) \Theta z_t, \forall m = \overline{1, M}$ . Ограничение свойств технологических соединений примет вид  $f(z[s_j, u_l]) \Theta z_t, \forall l = \overline{1, N_l}$ .

Тогда будем считать системой ограничений математической модели систему правил:

$$\begin{aligned} & [\text{Если } F^{1,r}(\cdot) \gamma_1 \dots \gamma_i F^{i,r}(\cdot), \text{ то } F^{1,r}(\cdot) \gamma_1 \dots \gamma_j F^{j,r}(\cdot)]_k \\ & \text{или} \\ & [F^{1,r}(\cdot) \gamma_1 \dots \gamma_i F^{i,r}(\cdot) \Rightarrow F^{1,r}(\cdot) \gamma_1 \dots \gamma_j F^{j,r}(\cdot)]_k, \quad (1) \\ & \text{при } k = \overline{1, K}, r = \overline{1, 5}, \end{aligned}$$

где  $F^{i,r}(\cdot), F^{j,r}(\cdot)$  – функции, объединяющие ограничения свойств логическими И, ИЛИ;  $r$  – вид функции [11];  $\gamma_i \in \{\text{И, ИЛИ}\}$ .

Таким образом, допустимым является вариант решения, для которого выполняется приведенная выше система ограничений математической модели, а значение критерия позволяет выбрать среди нескольких допустимых вариантов оптимальный.

### Метод формирования и контроля ограничений

Суть метода формирования и контроля ограничений состоит в применении экспертной системы для проверки выполнения системы ограничений в процессе получения решения задачи компоновки, а также в полученном варианте решения.

Порядок формализации ограничений, определенных нормативными документами, технологическими требованиями, особенностями эксплуатации объекта и прочим, при формировании правил базы знаний экспертной системы описывается процедурой формирования ограничений. Данный подход одинаков для всех ограничений, кроме требующих проведения специальных расчетов. Задание таких ограничений имеет некоторые отличия, которые рассмотрены отдельно.

Каждое ограничение записывается в виде продукционного правила. Для этого определяется условие и следствие. Ограничение в виде правила записывается следующим образом: «Если тип размещаемого аппарата равен типу уже размещенного в помещении, то аппарат необходимо размещать в том же помещении». Затем выделяются ограничения свойств, соответствующие условию и следствию. Если условие содержит комбинацию ограничений свойств, то сначала выделяются данные ограничения, а затем строится их комбинация. Пусть в примере для свойства «тип» его номер  $j_1 = 5$ , тогда условие примет вид  $z[s_5, x_i] = z[s_5, x_j]$  И  $x_j \in u_m$ , а следствие соответственно –  $x_i \in u_m$ .

После того как формализованы условие и следствие правила, оно записывается в виде «Если  $A$ , то  $B$ ». В данном примере правило примет вид: Если  $z[s_5, x_i] = z[s_5, x_j]$  И  $x_j \in u_m$ , то  $x_i \in u_m$ . Представленная процедура проводится для каждого ограничения в решаемой задаче.

Для определения некоторых условий необходимы специальные расчеты. Например, гидродинамические расчеты для определения максимальной длины трубопровода. Тогда запишем ограничение в общем виде

$$\text{Если } f(z_1, z_2, \dots, z_n) \Theta z_f, \text{ то } B, \quad (2)$$

где  $f(z_1, z_2, \dots, z_n)$  – функция, зависящая от значений свойств объектов и областей;  $z_1, z_2, \dots, z_n$  – значения свойств;  $z_f$  – ограничение значения функции.

Процедура формирования ограничений в данном случае будет выполняться следующим образом. Аналогично выбирается условие и следствие правила. Затем выбираются свойства, от которых зависит значение рассчитываемого показателя. Для данного примера это число точек изменения направления трубопровода, диаметр и давление на входе. Такие свойства являются переменными для функции расчета. Правило включается в систему, при этом функция записывается как обращение к некоторой предопределенной функции.

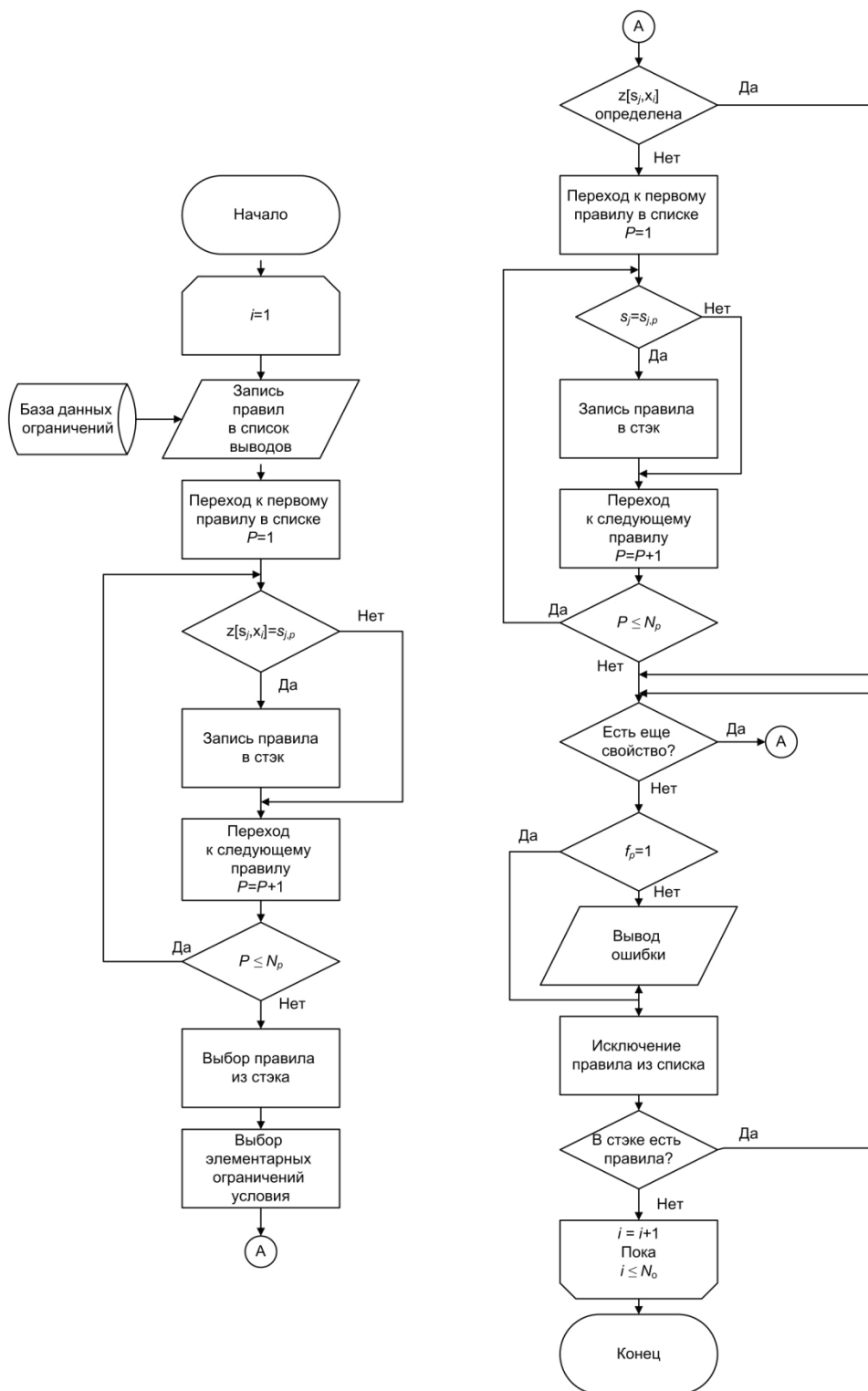
*Замечание.* Набор функций процедур (функций специализированного расчета) определяется заранее, что сужает область применения данного подхода при решении задач на практике с применением ЭВМ. Применение библиотек расчетов позволяет применять подход в различных предметных областях.

Формализованное условие записывается в базу знаний в виде символьной строки, содержащей правило на формальном языке. Рассмотрим грамматику формального языка записи правил:

```

<правило>:= ЕСЛИ <условие> ТО <следствие>
<условие>:=<выражение>
<следствие>:=<выражение>
<выражение>:=<логическая функция>{<логический оператор><логическая функция>}
<логический оператор>:=И / ИЛИ
<логическая функция>:=<ограничение>{<логический оператор><ограничение>}
<ограничение>:=<функция><оператор><значение>
<оператор>:= <|<|>|>|=|≠
<значение>:=<свойство>/<константа>
<функция>:=<функция свойства1>/<функция свойства2>
<функция свойства1>:=<слагаемое>{+/- <слагаемое>}
<слагаемое>:=<множитель>{* / "/" <множитель>}
<множитель>:=<свойство>/<константа>
<функция свойства2>:=<имя>(<список параметров>)
<список параметров>:=<свойство>{, <свойство>}
<свойство>:=<свойство объекта>/<свойство области>/<свойство соединения>
<свойство объекта>:=s< номер >x< номер >
<свойство области>:=s< номер >um< номер >
<свойство соединения>:=s< номер >u1<номер>
<номер>:=<число>
<константа>:=<строка>/<число>

```



**Рис. 2. Блок-схема процедуры проверки ограничений:**

$P$  – номер правила;  $N_p$  – число правил

Второй частью разработанного метода является процедура контроля ограничений. Она состоит в упорядоченной проверке ограничений для каждого размещаемого объекта с определением выполнения всех ограничений при помощи механизма логического вывода (рис. 2).

Для проверки применен обратный механизм вывода. Из базы знаний в список выводов записываются все правила. Далее последовательно выбираются из данного списка те правила, которые определяют свойства объекта. При этом сравнивается значение свойства, определенное правилом, с текущим значением. Если правилом определяется другое значение, то оно не рассматривается. Выбранные правила записываются в стек условий.

Для проверки из стека извлекаются последовательно все правила, начиная с первого. Для этого правила в список ограничений условия записываются соответствующие элементарные ограничения свойств объектов и областей. Эти свойства, в свою очередь, могут определяться правилами, заданными в базе знаний.

Если значение свойства объекта или области отсутствует в рабочей памяти (свойство не определено), то осуществляется поиск правил, определяющих значение неизвестных свойств, в списке выводов. Эти правила записываются в начало стека условий. Процесс проверки переходит к первому правилу в стеке. Таким образом, осуществляется определение свойств объектов и областей.

Если все значения свойств, необходимые для определения выполнения условия, определены, то они подставляются в функцию условия, и проверяется выполнение правила.

*Замечание.* Правило считается выполненным, если функция-условие  $f_p$ , записанная в стек логических выводов имеет значение истины (логическая 1). Если правило не выполняется, то его номер и номер невыполненного условия заносится в список ошибок.

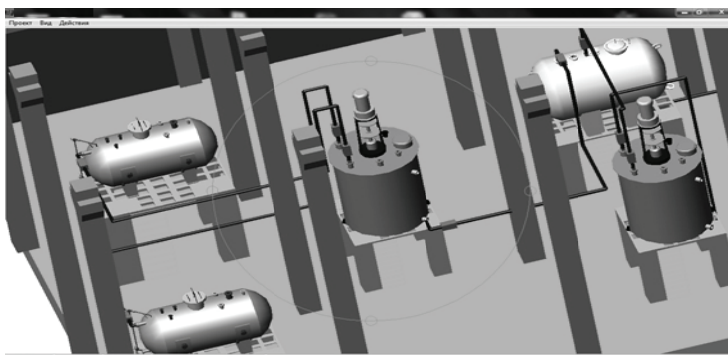
Проверка продолжается до последнего правила в стеке. После окончания проверки правила выбираются из списка ошибок. Для пользователя строится протокол проверки, содержащий номер правила, номер невыполненного условия и само правило.

Приведенная процедура проверки проводится для каждого объекта. Таким образом, устанавливается выполнение всех правил системы ограничений для каждого объекта и области. При наличии ошибок процедура не останавливается, что позволяет за один проход проверить систему ограничений и получить список невыполненных правил. При решении задачи компоновки на каждом шаге алгоритма изменяются свойства одного или малой группы объектов. Таким образом, проверка выполнения всей системы правил нецелесообразна. Достаточно проверить правила, в которых участвуют измененные свойства группы объектов. Тогда для проверки в стек логического вывода извлекаются все правила, в условной части которых стоят ограничения изменившихся свойств.

### **Программное обеспечение экспертной системы**

На основе представленного математического обеспечения и алгоритмов формирования и контроля ограничений разработан прототип экспертной системы компоновки промышленных объектов. Данный программный продукт предназначен для автоматизированного проектирования компоновки химических предприятий с учетом правил компоновки, определяемых на основе экспертной информации.

Неотъемлемой частью таких систем является наличие графического интерфейса, позволяющего удобно задавать исходные данные и в полной мере отображать получаемые проектные решения. Кроме того, использование систем трех-



**Рис. 3. Виртуальная 3D-модель промышленного объекта**

мерного моделирования в настоящее время является обязательным требованием при проектировании промышленных объектов, так как зачастую наличие 3D-модели объекта является требованием технического задания (рис. 3). На основе создаваемого виртуального макета как проектировщик, так и сам заказчик может, не прибегая к сложным средствам, определить геометрическую согласованность модели, отсутствие коллизий, сформировать основные чертежи, получить исходные данные для расчетов и смежных задач. Корректно построенная модель позволяет получать абсолютно точные перечни оборудования, изделий и материалов, используемых в этой модели, – спецификации, ведомости материалов и прочее.

Частью графического интерфейса является система электронно-графических каталогов (ЭГК), предназначенная для выбора оборудования, которое размещается на проектируемом предприятии. Также с помощью системы ЭГК возможно получение справочной информации об оборудовании, такой как тип, назначение, конструктивные особенности, назначение штуцеров. При этом пользователю при работе с ЭГК доступны графические образы оборудования [12].

Для проектной организации использование комплексного 3D-моделирования промышленных объектов позволяет значительно повысить качество проектирования, оценить ситуацию на предпроектной стадии работы, повысить конкурентоспособность организации на рынке, а также способствует инновационному развитию [13].

**Заключение.** Разработанная экспертная система компоновки промышленных объектов позволяет, с одной стороны, повысить качество получаемых решений за счет учета всех необходимых требований, а с другой стороны, применение экспертной информации для формирования ограничений упрощает конфигурацию системы под необходимые требования. Это позволяет использовать программный комплекс для решения класса задач компоновки промышленных объектов. Представленный подход может применяться, в том числе, и для решения задачи компоновки в различных предметных областях.

#### *Список литературы*

1. Егоров, С. Я. Разработка и исследование виртуальных моделей цеха на основе аналитических и процедурных моделей компоновки промышленных объектов / С. Я. Егоров, М. Н. Ерыпалова, К. А. Шаронин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 453 – 456.
2. Кафаров, В. В. Основы автоматизированного проектирования химических производств / В. В. Кафаров, В. Н. Ветохин ; под ред. И. М. Макарова ; АН СССР, Отд-ние информатики, вычисл. техники и автоматизации. – М. : Наука, 1987. – 623 с.

3. Кафаров, В. В. Математическая постановка задачи оптимального размещения оборудования в объеме цеха / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин, Б. Б. Богомолов // Хим. пром-сть. – 1980. – № 1. – С. 51 – 54.
4. Егоров, С. Я. Методология автоматизированного поиска объемно-планировочных решений химических производств / С. Я. Егоров // Хим. пром-сть сегодня. – 2006. – № 10. – С. 35 – 55.
5. Koopmans, T. C. Assignment Problems and the Location of Economic Activities / T. C. Koopmans, M. Beckmann // *Econometrica*. – 1957. – No. 25(1). – P. 53 – 76.
6. Meller, R. D. Optimal Facility Layout Design / R. D. Meller, V. Narayanan, P. H. Vance // *Operations Research Letters*. – 1999. – No. 23(3 – 5). – P. 117 – 127.
7. Lee, Y. H. A Shape-Based Block Layout Approach to Facility Layout Problems Using Hybrid Genetic Algorithm / Y. H. Lee, M. H. Lee // *Computers & Industrial Engineering*. – 2002. – No. 42. – P. 237 – 248.
8. Yang, T. Layout Design for Flexible Manufacturing Systems Considering Single-Loop Directional Flow Patterns / T. Yang, B. A. Peters, M. Tu // *European Journal of Operational Research*. – 2005. – No. 164(2). – P. 440 – 455.
9. 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 – 466.
10. Мокрозуб, В. Г. Программное обеспечение автоматизированных систем размещения объектов в пространстве, инвариантное к предметной области / В. Г. Мокрозуб, К. А. Шаронин, К. В. Немтинов // *Науч.-техн. информ. Сер. 2. Информ. процессы и системы*. – 2012. – № 3. – С. 11 – 29.
11. Егоров, С. Я. Автоматизированная информационная система поддержки принятия проектных решений по компоновке промышленных объектов. Часть 4. Применение экспертных систем для проверки правил компоновки / С. Я. Егоров, К. А. Шаронин, К. В. Немтинов // *Информ. технологии в проектировании и пр-ве*. – 2013. – № 4. – С. 36 – 43.
12. Технология создания электронного банка данных многоцелевого назначения / С. Я. Егоров [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 284 – 288.
13. Бормотова, Т. Опыт применения комплексного трехмерного проектирования в проектах обустройства месторождений / Т. Бормотова, А. Бальшев [Электронный ресурс] // *САПР и графика : электрон. журн.* – 2013. – № 3. – Режим доступа : <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=23679&iid=1091> (дата обращения: 14.03.2014).

---

## The Prototype of Expert System for Industrial Objects Layout

S. Ya. Egorov, K. A. Sharonin

*Department "Automated Design of Process Equipment", TSTU;  
sharonin68@gmail.com*

**Key words and phrases:** construction design; expert knowledge; expert systems; layout; mathematical modeling.

**Abstract:** In this article industrial objects design questions are considered. The authors describe the expert system for industrial objects layout, which allows you to form restrictions as production rules system. In the article algorithms for form and control procedures for computer-aided design layout of industrial objects are presented. In conclusion program realization of the system is considered.



## References

1. Egorov S.Ya., Erypalova M.N., Sharonin K.A. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 453-456.
2. Kafarov V.V., Vetokhin V.N., Makarov I.M. (Ed.), USSR Academy of Sciences, *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya khimicheskikh proizvodstv* (Fundamentals of computer-aided design of chemical plants), Moscow: Nauka, 1987, 623 p.
3. Kafarov V.V., Meshalkin V. P., Bogomolov B.B. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 1980, no. 1, pp. 51-54.
4. Egorov S.Ya. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*, 2006, no. 10, pp. 35-55.
5. Koopmans T.C., Beckmann M. *Econometrica*, 1957, no. 25(1), pp. 53-76.
6. Meller R.D., Narayanan V., Vance P.H. *Operations Research Letters*, 1999, no. 23(3-5), pp. 117-127.
7. Lee Y.H., Lee M.H. *Computers & Industrial Engineering*, 2002, no. 42, pp. 237-248.
8. Yang T., Peters B.A., Tu M. *European Journal of Operational Research*, 2005, no. 164(2), pp. 440-455.
9. Mokrozub V.G., Serdyuk A.I., Shamaev S.Yu., Kamenev S.V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 462-466.
10. Mokrozub V.G., Sharonin K.A., Nemtinov K.V. *Nauchno-tehnicheskaya informatsiya. Seriya 2. Informatsionnye protsessy i sistemy*, 2012, no. 3, pp. 11-29.
11. Egorov S.Ya., Sharonin K.A., Nemtinov K.V. *Information Technologies in Design and Production*, 2013, no. 4, pp. 36-43.
12. Egorov S.Ya., Sharonin K.A., Nemtinov K.V., Andreev G.I. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 284-288.
13. Bormotova T., Balyshhev A. *SAPR i grafika*, 2013, no. 3, available at: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=23679&iid=1091> (accessed 14 March 2014).

---

### Prototyp des Expertensystems der Zusammenstellung der industriellen Objekte

**Zusammenfassung:** Es sind die Fragen der Projektierung betrachtet und es ist das Expertensystem der Zusammenstellung der industriellen Objekte, das die Beschränkungen in der Art des Systems der Produktionsregeln zu formalisieren erlaubt, beschrieben. Es sind die Algorithmen der Prozeduren der Bildung und der Kontrolle der Beschränkungen bei der automatisierten Projektierung der Zusammenstellung der industriellen Objekte angeführt. Es ist die Programmrealisierung des Systems dargelegt.

---

### Prototype du système d'expert de l'arrangement des objets industriels

**Résumé:** Sont examinées les questions de la conception et décrit le système d'expert de l'arrangement des objets industriels permettant de formuler les restrictions en vue du système des règles de production. Sont cités les algorithmes des procédés de formation et de contrôle des restrictions lors de la conception automatisée de l'arrangement des objets industriels. Est présentée la réalisation de programme du système.

---

**Авторы:** *Егоров Сергей Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированное проектирование технологического оборудования»; *Шаронин Кирилл Анатольевич* – аспирант кафедры «Автоматизированное проектирование технологического оборудования», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Арзамасцев Александр Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерное и математическое моделирование», ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина», г. Тамбов.