

*На правах рукописи*



**ГРОМОВ Максим Сергеевич**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА  
КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПРОИЗВОДСТВ В ЦЕХАХ АНГАРНОГО ТИПА**

05.25.05 – Информационные системы и процессы,  
правовые аспекты информатики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тамбов 2006

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете на кафедре «Автоматизированное проектирование технологического оборудования».

**Научный руководитель**    Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
***Малыгин Евгений Николаевич***

**Научный консультант**    кандидат технических наук, доцент  
***Егоров Сергей Яковлевич***

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
***Павлов Владимир Иванович***

доктор технических наук, профессор  
***Арзамасцев Александр Анатольевич***

**Ведущая организация**    Воронежская государственная  
технологическая академия (**ВГТА**)

Защита диссертации состоится 30 июня 2006г. в 15 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 Тамбовского государственного технического университета по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, Большой зал.

Отзыв на автореферат (в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью) просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.260.05 А.А. Чурикову.

E-mail: [egorov@mail.gaps.tstu.ru](mailto:egorov@mail.gaps.tstu.ru)

Факс: 8-4752-72-18-13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТГТУ.

Автореферат разослан « 29 » мая 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д-р техн. наук, профессор



**А.А. Чуриков**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В современных рыночных условиях определяющими факторами успеха в промышленном производстве являются уменьшение времени выхода новой продукции на рынок, снижение стоимости и повышение качества. Сокращение цикла проектирования и подготовки производства, подразумевающее внедрение систем автоматизации проектирования (САПР), автоматизированных информационных систем (АИС) может способствовать своевременному выходу ее на рынок и тем самым созданию конкурентоспособной продукции. На этапе проектирования производств возникает ряд задач, от эффективности решения которых зависят качество и себестоимость конечной продукции.

Проектирование химических производств включает в себя такие задачи, как разработка технологической схемы, выбор аппаратного оформления, компоновку оборудования, оценку экологической безопасности производства и ряд других задач. Этап компоновки оборудования является одним из наиболее трудоемких.

Наиболее перспективным направлением повышения производительности и качества проектных работ является применение математических методов, информационных технологий и использование ЭВМ для оптимизации проектных решений. Отечественными и зарубежными учеными уделялось большое внимание автоматизации проектирования компоновочных решений в многоэтажных цехах. Однако до сих пор не имеющие практической реализации, остаются вопросы автоматизации компоновок и принятия объемно-планировочных решений при проектировании промышленных производств в цехах ангарного типа. Оборудование в таких цехах устанавливается на фундаментах и металлоконструкциях. Высотное расположение оборудования, этажерок и площадок обслуживания определяется исходя из условий оптимального транспорта веществ между аппаратами, безопасности производств, удобства обслуживания оборудования и экономических показателей. Применение современных информационных технологий к решению задач компоновки оборудования в цехах ангарного типа затруднено отсутствием формализованных аналитических и процедурных моделей компоновки оборудования.

Актуальность темы обусловлена отсутствием подходов к автоматизированному поиску оптимальных проектных решений компоновки оборудования промышленных производств в цехах ангарного типа.

**Объектом** исследования является компоновка оборудования промышленных производств в цехах ангарного типа.

**Предметом** исследования является автоматизированная информационная система, основывающаяся на аналитических и процедурных моделях размещения технологического оборудования и трассировки трубопроводов промышленных производств в цехах ангарного типа.

**Цель работы.** Разработать автоматизированную информационную систему на основе аналитических и процедурных моделей размещения

технологического оборудования и трассировки трубопроводов промышленных производств в цехах ангарного типа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1 Провести анализ существующих автоматизированных информационных систем компоновки объектов в пространстве, моделей и методов поиска проектных решений по компоновке.

2 Разработать структуру автоматизированной информационной системы компоновки оборудования промышленных объектов, учитывающую специфику задачи компоновки в цехах ангарного типа.

3 Разработать структуру базы данных для хранения текстовой и графической информации об объектах компоновки, ограничений на проектные решения, а также для хранения информации по проектным решениям.

4 Провести анализ условий, влияющих на принятие проектных решений по компоновке оборудования и осуществить их формализацию.

5 Разработать способ описания объектов компоновки, позволяющий учитывать особенности размещения в пространстве различных типов объектов, таких как разногабаритное технологическое оборудование, система технологических трубопроводов, строительные конструкции ангарного цеха, металлоконструкции.

6 Сформулировать математические постановки задач, возникающих при компоновке оборудования в цехах ангарного типа.

7 Разработать аналитические и процедурные модели размещения технологического оборудования и трассировки технологических трубопроводов в цехах ангарного типа.

8 Разработать методику решения задачи компоновки в цехах ангарного типа, включающей размещение технологического оборудования, нахождение оптимальных объемно-планировочных решений цеха, трассировку технологических трубопроводов и размещение трубопроводной арматуры.

**Научная новизна.** 1) На основе проведенного анализа процесса компоновки оборудования промышленных производств в цехах ангарного типа впервые поставлена задача совместного оптимального автоматизированного проектирования: размещения технологического оборудования, трассировки трубопроводов, определения конфигурации строительных конструкций и размещения трубопроводной арматуры.

2) Разработан способ многоуровневого описания объектов компоновки, заключающийся в представлении объектов компоновки в виде комплекса простейших геометрических фигур, выделении подобъектов, собственные ограничения и условия размещения в пространстве которых заданы различными видами представления информации.

3) Разработана аналитическая модель размещения технологического оборудования в цехах ангарного типа, учитывающая влияние таких факторов, как условия транспортировки веществ между аппаратами, условия обслуживания и ремонта оборудования согласно требованиям нормативно-технической документации.

4) Разработана аналитическая модель трассировки технологических трубопроводов в цехах ангарного типа, учитывающая влияние таких факторов, как условия транспортировки веществ между аппаратами при различных режимах совместной работы аппаратов, условия прокладки трубопроводов и размещения трубопроводной арматуры.

5) Разработана процедурная модель трассировки разветвленной системы технологических трубопроводов, основанная на выделении подмножества технологических связей аппаратов, в состав которых входят общие узлы, и последовательной трассировке всех связей от аппаратов до размещенных узлов на проведенных в пространстве трассах.

**На защиту выносятся основные положения:**

1 Постановка задачи совместного оптимального проектирования: размещения технологического оборудования, трассировки трубопроводов, определения конфигурации строительных конструкций и размещения трубопроводной арматуры.

2 Способ многоуровневого описания объектов компоновки.

3 Аналитическая модель размещения технологического оборудования в цехах ангарного типа.

4 Аналитическая модель трассировки технологических трубопроводов в цехах ангарного типа.

5 Процедурная модель трассировки разветвленных трубопроводов.

**Практическая ценность.** Предложенная методика позволяет решить общую задачу компоновки в виде последовательности решений подзадач компоновки с изменением детализации описания геометрии объектов и учетом ограничений, разбитых на классы в зависимости от степени их влияния и необходимости соблюдения на различных этапах решения.

Предложены критерии оптимальности размещения оборудования и трассировки трубопроводов в цехах ангарного типа, позволяющие оценить капитальные затраты на строительные конструкции цеха, трубопроводы, средства транспортировки веществ, металлоконструкции для этажерок и площадок обслуживания, а также эксплуатационные затраты на транспортировку веществ между аппаратами.

Созданная автоматизированная информационная система компоновки оборудования промышленных производств в цехах ангарного типа учитывает способ многоуровневого информационного описания объектов компоновки и разработанные аналитические и процедурные модели размещения оборудования и трассировки трубопроводов.

С помощью разработанной системы были решены задачи размещения оборудования и трассировки трубопроводов ряда промышленных объектов: реконструкция производства емкостного оборудования и производства насосных агрегатов ОАО «Первомайскхиммаш»; проектирование отделений механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья спиртовых заводов мощностью 500 дал/сут и 1500 дал/сут проектным отделом ОАО «Тамбовский завод "Комсомолец" им. Н.С. Артемова».

**Апробация работы.** Результаты исследований и отдельные материалы работы докладывались и обсуждались на: IV Тамбовской межвузовской научной конференции «Актуальные проблемы информатики и информационных технологий» (Тамбов, ТГУ, 2000 г.); V Тамбовской межвузовской научной конференции «Актуальные проблемы информатики и информационных технологий» (Тамбов, ТГУ, 2001 г.); научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». ММТТ-14 (Смоленск, 2001 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы отражены в 10 печатных работах, в том числе в научно-технических журналах РФ – 3 публикации.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы. Объем диссертационной работы составляет 192 страницы машинописного текста, содержит 50 рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 110 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулирована цель работы, обоснована ее актуальность, научная новизна и практическая значимость. Дается общая характеристика содержания диссертационной работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

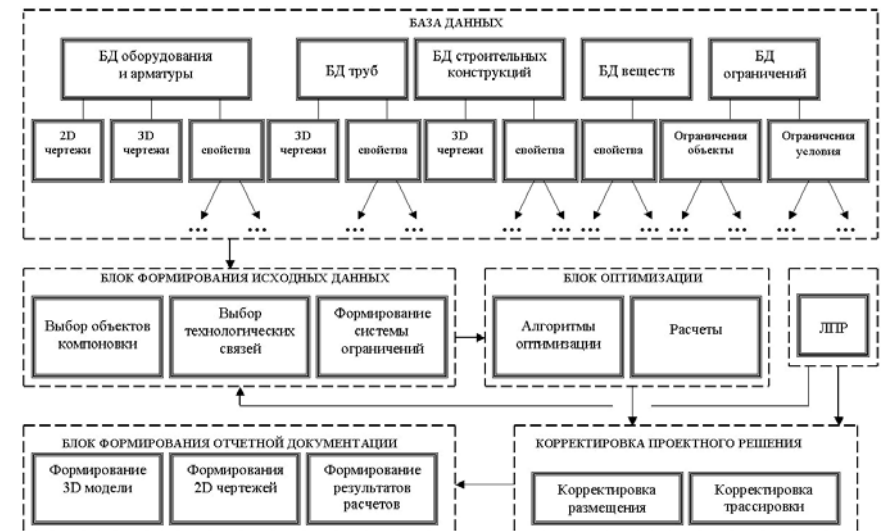
**В первой главе** представлен анализ существующих моделей и методов решения задач размещения и трассировки в различных отраслях промышленности. Осуществлен обзор существующих автоматизированных информационных систем для решения задач размещения и трассировки. На основании проведенного анализа сформулированы выводы и основные задачи исследования.

**Во второй главе** разработана структура автоматизированной информационной системы компоновок в цехах ангарного типа, которая представлена на рис. 1.

Автоматизированная информационная система компоновок включает в себя ряд блоков, между которыми в процессе получения проектного решения осуществляется обмен информацией. Часть данных в процессе проектирования вносит в систему эксперт в виде исходных данных, промежуточных корректировок и ограничений.

На рис. 2 представлена структура информационных потоков для задачи компоновки.

Для поиска начального варианта размещения используются следующие исходные данные: предельные габариты цеха; размеры, объем и масса аппаратов; способ транспорта веществ между аппаратами. После осуществления первоначального размещения координаты аппаратов передаются к следующему блоку – оптимизации размещения.



**Рис. 1 Структура автоматизированной информационной системы компоновок в цехах ангарного типа**

На этапе оптимизации размещения используются исходные данные, полученные от блока начального размещения, ограничения 1 – 6 базы ограничений, а также осуществляется обмен данными с блоком расчетов. При оптимизации размещения осуществляется предварительная оценка транспортировки веществ заданным способом между аппаратами. В блок расчетов передаются данные о текущем размещении аппаратов, способе транспорта между ними, физико-химических свойствах транспортируемых веществ. От блока расчетов поступает информация о возможности осуществления транспорта веществ заданным способом между аппаратами.

При определении конфигурации металлоконструкций используются данные о геометрии аппаратов и их взаимном расположении.

К блоку расчетов поступают данные о высоте расположения проектируемой площадки и ее размерах. От блока расчетов поступает информация о металлоемкости конструкции. После определения конфигурации металлоконструкций данные передаются к следующему блоку – трассировке технологических трубопроводов.

На этапе трассировки технологических трубопроводов осуществляется определение конфигурации трасс с учетом ограничений 1, 8 – 14 базы ограничений и следующих исходных данных: способа транспорта веществ между аппаратами, физико-химических свойств транспортируемых веществ, размеров и объема аппаратов, а также данных о размещении аппаратов и конфигурации металлоконструкций, полученных с предыдущих блоков.

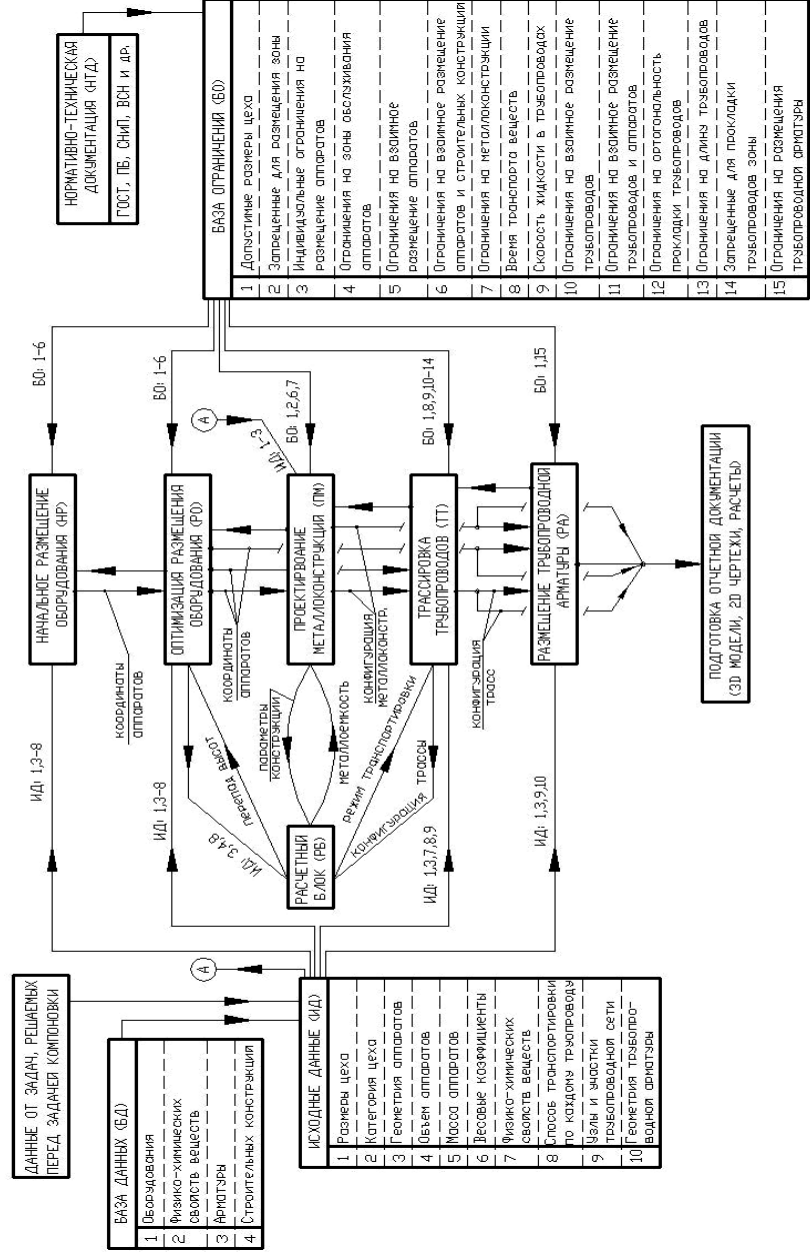


Рис. 2 Структура информационных потоков для решения задачи компоновки



В случае если невозможно осуществить трассировку с учетом всех условий и ограничений, поступает обратный сигнал к задаче размещения.

На этапе размещения трубопроводной арматуры осуществляется перебор возможных вариантов расположения каждой единицы арматуры. При этом используются данные о геометрии размещаемой арматуры, размеры и координаты размещения аппаратов и металлоконструкций, а также ограничения на размещение арматуры.

При подготовке отчетной документации формируется 3D модель цеха с размещенным оборудованием, площадками и трубопроводами.

Также во второй главе исследованы факторы, влияющие на принятие решений по компоновке оборудования. Рассмотрены такие факторы, как способы транспортировки жидких и твердых (сыпучих) веществ, выбор типа конструкции цеха, обеспечение безопасности производства и т.д.

Исследованы условия обеспечения транспорта жидких и сыпучих веществ между аппаратами в зависимости от режима их совместной работы.

На основе проведенного анализа дана классификация факторов, влияющих на проектное решение компоновки:

- а) факторы, влияющие на функционирование схемы;
- б) факторы, влияющие на безопасность работы людей, возможность обслуживания оборудования и трубопроводов, ремонта;
- в) экономические факторы;
- г) факторы, обеспечивающие удобство обслуживания и ремонта оборудования.

Поставлена общая задача компоновки в цехах ангарного типа.

**В третьей главе** осуществлена разработка способа многоуровневого описания объектов компоновки с помощью комплексов простейших геометрических фигур, а также информационное описание системы технологических трубопроводов с помощью матриц связей, узлов и участков. Матрица связей хранит идентификацию аппаратов источников и приемников, принадлежность к связи узлов технологических трубопроводов. Матрицы узлов и участков вводятся для описания разветвленных трубопроводов и определяют общие точки для различных связей.

На основе проведенного во второй главе анализа разработана аналитическая модель размещения технологического оборудования в цехах ангарного типа, включающая следующие условия:

Условие обеспечения транспорта веществ самотеком:

$$\Delta Z = Z_{f1l} - Z_{f2l} \geq (h_d + \sum h_m) K_{ст}, \forall l: f4l = 1. \quad (1)$$

Условие обеспечения транспорта веществ перекачиванием:

$$\Delta Z = Z_{f1l} - Z_{f2l} \leq \frac{P_{f1l} - P_{f2l}}{\gamma_l} - (h_d + \sum h_m) K_{ст}, \forall l: f4l = 4. \quad (2)$$

Условие обеспечения транспортировки насосом:

$$H_n \geq (Z_{f2l} - Z_{f1l}) + \frac{P_{f2l} - P_{f1l}}{\gamma_l} + (h_d + \sum h_m) K_{ст}, \forall l: f4l = 3. \quad (3)$$

Условие обеспечения самотечного транспорта сыпучих материалов:

$$\left( \arctg \left( \frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \right) \geq \omega_m \right) \wedge (\Delta z > 0); \quad (4)$$

$$\Delta X = X_{f1l} - X_{f2l}, \quad \Delta Y = Y_{f1l} - Y_{f2l}, \quad \Delta Z = Z_{f1l} - Z_{f2l}, \quad \forall l: f4l = 5.$$

Условие взаимного расположения аппаратов, входящих в состав установок:

$$\begin{cases} (X_j \geq X_i + \text{const } 1) \vee (X_j \leq X_i + \text{const } 2); \\ (Y_j \geq Y_i + \text{const } 3) \vee (Y_j \leq Y_i + \text{const } 4), \quad \forall i, i \in A^3; \\ (Z_j \geq Z_i + \text{const } 5) \vee (Z_j \leq Z_i + \text{const } 6). \end{cases} \quad (5)$$

Условие непересечения зон обслуживания аппаратов с оборудованием и элементами строительных конструкций:

$$(U^{ZA} \cap U^A = \emptyset) \wedge (U^{ZA} \cap U^S = \emptyset). \quad (6)$$

Условие непересечения проходов с объектами компоновки:

$$(U^{np} \cap U^A = \emptyset) \wedge (U^{np} \cap U^S = \emptyset) \wedge (U^{np} \cap U^{ZA} = \emptyset). \quad (7)$$

Ограничения на размеры проходов:

$$(B_i^{np} \geq B^{np*}) \wedge (C_i^{np} \geq C^{np*}), \quad i = 1, 2, \dots, ng. \quad (8)$$

Ограничения на расстояния между аппаратами и другими объектами:

$$\min (\rho(U_i^A, U_j^A)) \geq \rho_{ан}, \quad \forall i, j \in A, i \neq j; \quad (9)$$

$$\min (\rho(U_i^A, U_j^S)) \geq \rho_{ан, стр}, \quad \forall i \in A, j \in S. \quad (10)$$

Ограничения на ширину и угол наклона лестниц с этажеров и площадок:

$$(\alpha_{*}^{лестн} \leq \alpha^{лестн} \leq \alpha^{лестн*}) \wedge (B^{лестн} \geq B_{*}^{лестн}). \quad (11)$$

Ограничения на размеры ангарного цеха:

$$(A^c_{*} \leq A^c \leq A^{c*}) \wedge (B^c_{*} \leq B^c \leq B^{c*}) \wedge (H^c_{*} \leq H^c \leq H^{c*}). \quad (12)$$

Условия геометрического непересечения объектов компоновки:

$$U_i^A \cap U_j^A = \emptyset, \quad \forall i, j \in A, i \neq j; \quad (13)$$

$$U_i^A \cap U_j^S = \emptyset, \quad \forall i \in A, j \in S. \quad (14)$$

Технологическое оборудование должно размещаться внутри цеха:

$$U_i^A \in U^c, \quad \forall i \in A. \quad (16)$$

Размещение отдельных единиц оборудования может быть определено:

$$X_m, Y_m, Z_m = \text{const}, \quad \forall m \in A^{11}. \quad (17)$$

Разработан критерий приведенных затрат для выбора оптимального варианта размещения технологического оборудования с определением размеров ангарного цеха и конфигурации внутренних строительных конструкций:

$$I^1 = (I_1^1 + I_2^1 + I_3^1 + I_4^1)E_n + \sum_{m=1}^M \mathfrak{D}_m, \quad (18)$$

где  $I_1^1, I_2^1, I_3^1, I_4^1$  – соответственно затраты на технологические трубопроводы, средства для транспорта веществ между аппаратами, строительные конструкции ангарного цеха, затраты на металлоконструкции (площадки обслуживания, этажерки).

Сформулирована постановка задачи размещения технологического оборудования в цехах ангарного типа:

Найти такой вариант размещения технологического оборудования в цехе ангарного типа  $A = A_i(X_i, Y_i, Z_i, \alpha_i), \forall i = 1, 2, \dots, I$ , габариты цеха  $S1 = (A^c, B^c, H^c)$  и конфигурацию внутренних строительных конструкций  $S2 = (\alpha_j^{\text{лестн}}, B_j^{\text{лестн}}, a_j^{\text{пл}}, b_j^{\text{пл}}, h_j^{\text{пл}}, x_j^{\text{пл}}, y_j^{\text{пл}}, z_j^{\text{пл}}), \forall j = 1, 2, \dots, J$ , при которых критерий приведенных затрат (18) достигает минимума и выполняются условия математической модели (1) – (17).

На основе проведенного во второй главе анализа разработана аналитическая модель трассировки технологических трубопроводов в цехах ангарного типа, включающая следующие условия.

Условие обеспечения транспортировки жидких веществ самотеком:

$$\Delta Z = Z_{f1l} - Z_{f2l} \geq h_d + \sum h_m, \forall l: f4l = 1. \quad (19)$$

Условие обеспечения транспортировки жидких веществ перекачиванием:

$$\Delta Z = Z_{f1l} - Z_{f2l} \leq \frac{P_{f1l} - P_{f2l}}{\gamma_l} - (h_d + \sum h_m), \forall l: f4l = 4. \quad (20)$$

Условие обеспечения транспорта веществ насосом:

$$H_n \geq (Z_{f2l} - Z_{f1l}) + \frac{P_{f2l} - P_{f1l}}{\gamma_l} + (h_d + \sum h_m), \forall l: f4l = 3. \quad (21)$$

Ограничение на скорость потока в трубопроводе:

$$\omega_l^H \leq \omega_l \leq \omega_l^B, \quad \forall l = 1, 2, \dots, L. \quad (22)$$

Условие самокомпенсации тепловых напряжений в трубопроводах:

$$(|x_{ij}^H - x_{ij}^K| \leq \rho_{\text{комп}}) \wedge (|y_{ij}^H - y_{ij}^K| \leq \rho_{\text{комп}}) \wedge (|z_{ij}^H - z_{ij}^K| \leq \rho_{\text{комп}}), \forall i, j \in L. \quad (23)$$

Условие отсутствия застойных зон для жидкостей:

$$(z_i^{n3} - z_i^{n2} \geq 0) \wedge (z_i^{n2} - z_i^{n1} \geq 0), \quad (24)$$

$n1 < n2 < n3$  – точки излома  $i$ -го участка.

Условие отсутствия застойных зон для газов:

$$(z_i^{n1} - z_i^{n2} > 0) \wedge (z_i^{n2} - z_i^{n3} > 0), \quad \forall i \in Uch^4, \quad n1 > n2 > n3. \quad (25)$$

Ограничение расстояния между трубопроводами:

$$\min(\rho(U_i^L, U_j^L)) \geq \rho_L, \quad \forall i, j \in L, \quad i \neq j. \quad (26)$$

Ограничение расстояния между трубопроводами и аппаратами:

$$\min (\rho(U_i^L, U_j^A)) \geq \rho_{\text{тр, ап}}, \quad \forall i \in L, \quad j \in A. \quad (27)$$

Ограничение расстояния между трубопроводами и строительными конструкциями:

$$\min (\rho(U_i^L, U_j^S)) \geq \rho_{\text{тр, стр}}, \quad \forall i \in L, \quad j \in S. \quad (28)$$

Ограничения на расстояние до ручного привода трубопроводной арматуры от уровня пола помещения или площадки:

$$\max (h(ar_i, S_k)) \leq h_{\text{арм}}, \quad \forall i \in Ar, \quad k \in S2. \quad (29)$$

Условие непересечения трубопроводов между собой:

$$U_i^L \cap U_j^L = \emptyset, \quad \forall i, j \in L, \quad i \neq j. \quad (30)$$

Условие непересечения трубопроводов и аппаратов:

$$U_i^L \cap U_j^A = \emptyset, \quad \forall i \in L, \quad j \in A. \quad (31)$$

Условие непересечения трубопроводов и строительных конструкций:

$$U_i^L \cap U_j^S = \emptyset, \quad \forall i \in L, \quad j \in S. \quad (32)$$

Ограничение на длину трубопроводов транспортирующих вязкие, ядовитые, взрывоопасные вещества:

$$\sum_{k=1}^{m_i} (|x_{ik}^H - x_{ik}^K| + |y_{ik}^H - y_{ik}^K| + |z_{ik}^H - z_{ik}^K|) \leq \delta_i, \quad \forall i \in L^9, \quad k = \overline{1, nt_i}. \quad (33)$$

Условие прокладки трубопроводов в ортогональной метрике:

$$\begin{cases} (x_{ij}^H - x_{ij}^K) (y_{ij}^H - y_{ij}^K) = 0; \\ (x_{ij}^H - x_{ij}^K) (z_{ij}^H - z_{ij}^K) = 0, \\ (y_{ij}^H - y_{ij}^K) (z_{ij}^H - z_{ij}^K) = 0. \end{cases} \quad \forall i \in L, \quad j \in 1, 2, \dots, nt_i; \quad (34)$$

Условие прокладки трубопроводов через строительные конструкции:

$$U_i^L \cap U_j^S \neq \emptyset, \quad \forall i \in L^{11}, \quad j \in S^{11}. \quad (35)$$

Разработан критерий приведенных затрат для выбора оптимального варианта трассировки технологических трубопроводов с размещением трубопроводной арматуры:

$$I^2 = (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2) E_H + \left[ \sum_{m=1}^M \mathcal{E}_m + \sum_{l=1}^L \Pi_l^{\text{тепл}} + \sum_{l=1}^L (A_T^l + P_T^l) \right], \quad (36)$$

где  $I_1^2$ ,  $I_2^2$ ,  $I_3^2$  – соответственно затраты на технологические трубопроводы, элементы (отводы) технологических трубопроводов, средства для транспорта веществ между аппаратами.

На основе разработанной аналитической модели трассировки технологических трубопроводов и критерия постановку задачи оптимальной трассировки трубопроводов с размещением трубопроводной арматуры в цехах ангарного типа можно записать следующим образом.

Найти такой вариант трассировки технологических трубопроводов  $T = (x_{ik}^H, x_{ik}^K, y_{ik}^H, y_{ik}^K, z_{ik}^H, z_{ik}^K)$ ,  $\forall i = 1, 2, \dots, L; k = 1, 2, \dots, W$  в цехе ангарно-

го типа и размещения трубопроводной арматуры ( $X_j^{ar}$ ,  $Y_j^{ar}$ ,  $Z_j^{ar}$ ),  $\forall j = 1, 2, \dots, D$ , при которых критерий приведенных затрат (36) достигает минимума и выполняются условия математической модели (19) – (35).

**В четвертой главе** предложена методика решения задачи компоновки, основывающаяся на последовательном решении задач размещения и трассировки с различной степенью детализации описания геометрии объектов. Методика включает следующие этапы:

- 1 Определение начального варианта размещения оборудования.
- 2 Оптимизация размещения оборудования.
- 3 Трассировка технологических трубопроводов.
- 4 Размещение трубопроводной арматуры.

На первом этапе решается задача начального размещения оборудования с применением весовых коэффициентов. Все аппараты разбиваются на группы, определяющие последовательность размещения, а при размещении аппаратов той или иной группы определяется очередность с помощью весовых коэффициентов.

Такие группы предлагается формировать по способу организации транспортировки веществ:

- размещение аппаратов по высотным отметкам, транспорт между которыми организован с помощью самотека;
- размещение сырьевых емкостей и емкостей готовой продукции;
- размещение аппаратов, транспорт между которыми организован с помощью перекачки;
- размещение аппаратов, транспорт между которыми организован с помощью насосов.

При размещении аппаратов каждой из этих групп очередность размещения определяется на основе весового коэффициента, дающего комплексную оценку по следующим параметрам: масса аппарата, объем аппарата, количество технологических связей аппарата с другими объектами системы.

Весовые коэффициенты размещаемых аппаратов вычисляются по формуле:  $K_i^B = K_M M_i + K_V V_i + K_S S_i$ .

После определения очередности размещения аппаратов для получения начального варианта размещения использован метод последовательного размещения в соответствии с очередностью и ограничениями на расстояние между аппаратами, а также с учетом способов транспорта веществ между аппаратами. Геометрическое описание каждого объектов компоновки на этапе начального размещения осуществляется одним параллелепипедом или одним цилиндром.

На втором этапе осуществляется оптимизация размещения оборудования. Улучшение варианта размещения проводится в две стадии. На первой стадии используется аппроксимация аппаратов одной фигурой (параллелепипед или цилиндр) с учетом следующих условий: осуществление транспорта веществ, обеспечение основных проходов в цехе, минимальное расстояние между аппаратами. На второй стадии объекты размещения

описываются комплексом параллелепипедов и цилиндров, что позволяет более точно учесть условия непересечения объектов. При этом применена процедурная модель размещения, основанная на принципе покоординатного спуска с параллельным определением конфигурации площадок обслуживания и этажерок.

Предложена процедурная модель для определения множества допустимых конфигураций площадок обслуживания для аппаратов и выбора оптимального варианта с учетом минимизации металлоемкости.

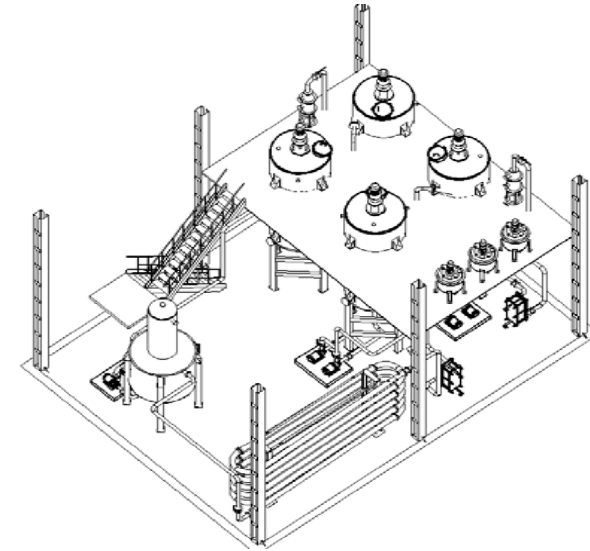
На третьем этапе осуществляется трассировка внутрицеховых технологических трубопроводов. Для трассировки простых (неразветвленных) трубопроводов разработана процедурная модель, основанная на проведении кратчайшей трассы между источником и приемником с обходом размещенных объектов в пространстве.

Для разветвленных трубопроводов разработана процедурная модель, состоящая из следующих этапов:

- 1) Формирование множества связей  $L' = \{l'_1, l'_2, \dots, l'_n\}$ , в состав которых входят узлы, общие с другими связями из этого же множества.
- 2) Трассировка связей из множества  $l'_i, i = 1, \dots, n$  как неразветвленных, пока у связи  $l'_i$  не найдется узла, общего с любой связью  $l'_m, m = 1, \dots, i - 1$ .
- 3) Каждая связь  $l'_m, m = i, i + 1, \dots, n$  трассируется от ее начала и до узла, который принадлежит к уже проведенной трассе. При этом размещение этого узла на проведенной трассе определяется перебором с шагом  $h$  по длине участков проведенной трассы.
- 4) Для каждого варианта расположения узла на проведенной трассе осуществляется трассировка трассы  $l'_i$  как неразветвленной.
- 5) Из всех полученных вариантов трассировки данной связи, удовлетворяющих условиям математической модели проектного решения трассировки, выбирается вариант, приводящий к минимуму критерия оптимальности для задачи трассировки.
- 6) Процесс трассировки заканчивается, когда будет осуществлена последовательная трассировка всех связей  $L' = \{l'_1, l'_2, \dots, l'_n\}$ .

На четвертом этапе осуществляется размещение трубопроводной арматуры. Оптимальное расположение арматуры на заданном участке трубопровода осуществляется перебором всех возможных вариантов размещения. Критерием отбора оптимального варианта является минимальное расстояние от размещаемой арматуры до планировочной отметки пола или ближайшей площадки обслуживания.

С использованием разработанной автоматизированной информационной системы были получены проектные решения размещения оборудования и трассировки трубопроводов ряда производств. На рис. 3 представлена 3D модель проектного решения компоновки, полученного в автоматизированном режиме для отделения механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья при производстве этилового спирта, спиртзавода мощностью 1500 дал/сут. В табл. 1 представлены показатели проектных решений, полученных вручную и с помощью разработанной системы.



**Рис. 3 3D размещение оборудования отделения механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья**

### **1 Параметры проектного решения компоновки**

Параметр	Ручная компоновка	Автоматизированная компоновка	Разность между значениями, %
Занятая оборудованием площадь цеха, м <sup>2</sup>	144	108	25
Общая длина технологических трубопроводов, м	138	109	21
Количество поворотов технологических трубопроводов, шт.	41	35	14,6
Общая площадь площадок обслуживания и этажеров, м <sup>2</sup>	144	54	62,5
Значение общего критерия приведенных затрат, р.	1 252 000	883 400	29,4

В результате оптимизации проектных решений по размещению оборудования и трассировке трубопроводов отделения разваривания крахмалистого сырья было получено уменьшение стоимости проектируемого производства (без учета стоимости технологического оборудования) на 29,4 % от стоимости варианта, полученного ручными методами, что составило 368 600 р.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1 На основе проведенного анализа процесса компоновки оборудования промышленных производств в цехах ангарного типа впервые поставлена задача совместного оптимального автоматизированного проектирования: размещения технологического оборудования, трассировки трубопроводов, определения конфигурации строительных конструкций и размещения трубопроводной арматуры.

2 Разработан способ многоуровневого описания объектов компоновки, заключающийся в представлении объектов компоновки в виде комплекса простейших геометрических фигур, выделении подобъектов, собственные ограничения и условия размещения в пространстве которых заданы различными видами представления информации

3 Разработана аналитическая модель размещения технологического оборудования в цехах ангарного типа, учитывающая влияние таких факторов, как условия транспортировки веществ между аппаратами, условия обслуживания и ремонта оборудования согласно требованиям нормативно-технической документации.

4 Разработана аналитическая модель трассировки технологических трубопроводов в цехах ангарного типа, учитывающая влияние таких факторов, как условия транспортировки веществ между аппаратами при различных режимах совместной работы аппаратов, условия прокладки трубопроводов и размещения трубопроводной арматуры.

5 Разработана процедурная модель трассировки разветвленной системы технологических трубопроводов, основанная на выделении подмножества технологических связей аппаратов, в состав которых входят общие узлы, и последовательной трассировке всех связей от аппаратов до размещенных узлов на проведенных в пространстве трассах.

6 Предложена методика решения общей задачи компоновки, в виде последовательности решений подзадач компоновки с изменением детализации описания геометрии объектов и учетом ограничений, разбитых на классы в зависимости от степени их влияния и необходимости соблюдения на различных этапах решения.

7 Предложены критерии оптимальности размещения оборудования и трассировки трубопроводов в цехах ангарного типа, позволяющие оценить капитальные затраты на строительные конструкции цеха, трубопроводы, средства транспортировки веществ, металлоконструкции для этажерок и площадок обслуживания, а также эксплуатационные затраты на транспортировку веществ между аппаратами.

8 Создана автоматизированная информационная система компоновки оборудования промышленных производств в цехах ангарного типа с учетом многоуровневого описания объектов компоновки и разработанных аналитических и процедурных моделей размещения оборудования и трассировки трубопроводов.

9 С помощью разработанной системы были решены задачи размещения оборудования и трассировки трубопроводов ряда промышленных



объектов: реконструкция производства емкостного оборудования и производства насосных агрегатов ОАО «Первомайскиммаш»; проектирование отделений механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья спиртовых заводов мощностью 500 дал/сут и 1500 дал/сут проектным отделом ОАО «Тамбовский завод "Комсомолец" им. Н.С. Артемова».

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\Delta X = X_{f1l} - X_{f2l}$ ,  $\Delta Y = Y_{f1l} - Y_{f2l}$ ,  $\Delta Z = Z_{f1l} - Z_{f2l}$  – разность координат между штуцером аппарата источника и приемника, м;  $f1l, f2l$  – элемент матрицы связей  $F$ , 1 – источник, 2 – приемник;  $f4l$  – признак способа транспорта;  $h_d, \Sigma h_m$  – потери напора по длине трубопровода и местные потери переливного трубопровода, м;  $K_{ст}$  – коэффициент сложности трубопровода;  $P_{f1l}, P_{f2l}$  – давление в аппарате-источнике и приемнике, Па;  $\gamma_l$  – удельный вес жидкости транспортируемой по  $l$ -й связи,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}^2)$ ;  $\omega_m$  – коэффициент сопротивления трубопровода при движении сыпучего материала;  $X_m, Y_m, Z_m$  – координаты объекта  $m$ ;  $U^A, U^L, U^S, U^{ZA}, U^{np}$  – множество точек пространства, занимаемого размещаемым оборудованием, трубопроводами, элементами строительных конструкций, зонами обслуживания, проходами;  $A_i^{np}, B_i^{np}, C_i^{np}$  – длина, ширина и высота  $i$ -го прохода;  $B^{np*}, C^{np*}$  – минимально допустимые размеры проходов в производственных помещениях;  $\rho(U_i, U_j)$  – расстояние между  $i$ -м и  $j$ -м объектом, м;  $\rho_{ап}$  – минимально допустимое расстояние между аппаратами;  $\rho_{ап, стр}$  – минимально допустимое расстояние между аппаратами и строительными конструкциями, м;  $\alpha^{лестн}$  – угол наклона лестниц для площадок обслуживания или этажерок, град;  $\alpha^{лестн*}$  – минимально и максимально допустимые углы наклона для лестниц в рассматриваемом помещении, град;  $B^{лестн}$  – ширина лестниц;  $B_*^{лестн}$  – минимально допустимая ширина лестниц, м;  $A^c, B^c, H^c$  – длина, ширина и высота производственного цеха, м;  $A^{c*}, B^{c*}, H^{c*}, A^{c*}, B^{c*}, H^{c*}$  – максимально и минимально допустимые значения длины, ширины и высоты производственного цеха, м;  $\omega_i^H, \omega_i^B$  – нижний и верхний пределы значений допустимой скорости для  $l$ -го трубопровода, м/с;  $x_{ij}^H, y_{ij}^H, z_{ij}^H, x_{ij}^K, y_{ij}^K, z_{ij}^K$  – координаты начала и конца  $j$ -го фрагмента  $i$ -го участка системы трубопроводов;  $\rho_{комп}$  – предельно допустимое расстояние для прямолинейных отрезков трубопроводов, при котором обеспечивается самокомпенсация тепловых напряжений, м;  $\rho_L$  – минимально допустимое расстояние между отрезками трубопроводов, м;  $\rho_{тр, ап}$  – минимально допустимое расстояние между отрезками трубопровода и аппаратами, м;  $\rho_{тр, стр}$  – минимально допустимое расстояние между отрезками трубопровода и элементами строительных конструкций, м;  $nt_i$  – количество отрезков  $i$ -го трубопровода;  $h(ar_i, S_k)$  – высота между  $k$ -й площадкой обслуживания или этажеркой и  $i$ -й трубопроводной арматурой, м;  $h_{арм}$  – максимально допустимая высота между уровнем пола, площадкой обслуживания или этажеркой и трубопроводной арматурой, м;  $E_n$  – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений;  $\mathcal{E}_m$  – затраты на электроэнергию, р.;  $\Pi_l^{тепл}$  – потери тепловой

энергии с поверхности трубопроводов, р.;  $A_t^l$  – амортизационные отчисления, р.;  $P_t^l$  – затраты на ремонт трубопроводов, р.;  $L^l$  – длина  $l$ -го трубопровода, м;  $d^l$  – диаметр  $l$ -го трубопровода, м;  $K_M, K_V, K_S$  – коэффициенты значимости составляющих весового коэффициента: массы, объема и количества технологических связей соответственно;  $M_i, V_i, S_i$  – масса, объем и количество технологических связей  $i$ -го аппарата.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1 Учебно-исследовательская подсистема автоматизированных расчетов транспортных трубопроводных сетей / С.Я. Егоров, И.В. Милованов, М.С. Громов, С.П. Майоров // Актуальные проблемы информатики и информационных технологий : материалы IV Тамб. межвуз. науч. конф. Тамбов, 2000. С. 19 – 20.

2 Егоров, С.Я. Учебно-исследовательская подсистема автоматизированного размещения оборудования ХТС / С.Я. Егоров, М.С. Громов // Труды ТГТУ : сб. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2001. Вып. 8. С. 206 – 210.

3 Егоров, С.Я. Подсистема автоматизированного размещения оборудования / С.Я. Егоров, М.С. Громов // Актуальные проблемы информатики и информационных технологий : материалы V Тамб. межвуз. науч. конф. Тамбов, 2001. С. 8 – 9.

4 Егоров, С.Я. Постановка задачи гидравлических расчетов транспортно-трубопроводных сетей химического предприятия / С.Я. Егоров, И.В. Милованов, М.С. Громов // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ-14 : сб. тр. Междунар. науч. конф. Смоленск, 2001. Т. 6. С. 151 – 153.

5 Егоров, С.Я. Система автоматизированного размещения оборудования в цехах ангарного типа / С.Я. Егоров, М.С. Громов // Математические методы в технике и технологиях : материалы 15-й Междунар. науч. конф. Тамбов, 2002. Т. 8. С. 146 – 148.

6 Егоров, С.Я. Система автоматизированного размещения оборудования и трассировки трубопроводов в цехах ангарного типа / С.Я. Егоров, М.С. Громов, С.П. Майоров // Труды ТГТУ : сб. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2003. Вып. 13. С. 223 – 227.

7 Егоров, С.Я. Автоматизация компоновки оборудования в цехах ангарного типа. Ч. 1 : Размещение технологического оборудования / С.Я. Егоров, В.А. Немтинов, М.С. Громов // Химическая промышленность. 2003. № 8. С. 21 – 28.

8 Автоматизация компоновки оборудования в цехах ангарного типа. Ч. 3 : Информационно-графическая система трехмерной компоновки оборудования / С.Я. Егоров, В.А. Немтинов, М.С. Громов, С.П. Майоров // Химическая промышленность. 2003. № 8. С. 35 – 39.

9 Егоров, С.Я. Информационно-логическая модель компоновки промышленных объектов / С.Я. Егоров, В.А. Немтинов, М.С. Громов // Научно-техническая информация. Сер. 2. 2006. № 4. С. 19 – 23.

10 Малыгин, Е.Н. Информационная система компоновки оборудования промышленных производств / Е.Н. Малыгин, С.Я. Егоров, М.С. Громов // Информационные системы и процессы. 2006. № 4.

---

---

Подписано к печати 25.05.2006.  
Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 1,0 уч.-изд. л.  
Тираж 100 экз. С. 292

Издательско-полиграфический центр ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14