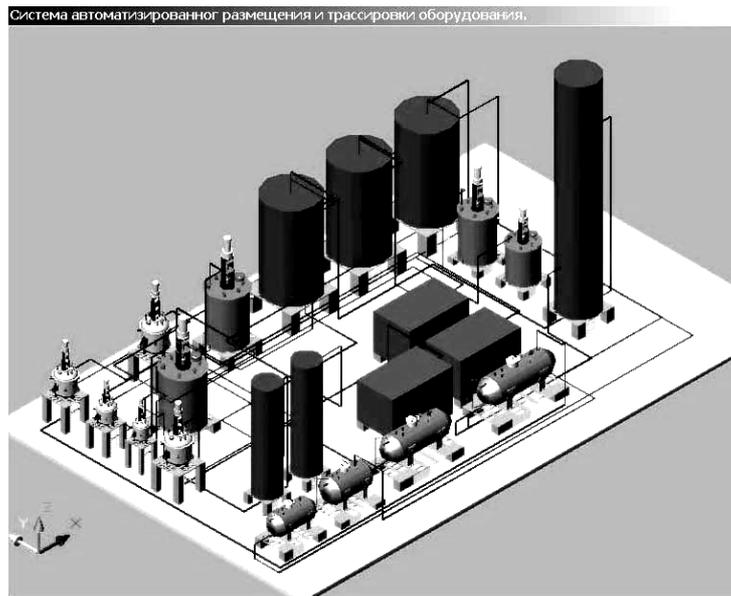


*С.Я. Егоров*

*Аналитические и процедурные модели компоновки  
оборудования промышленных производств*



МОСКВА  
«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»  
2007

*С.Я. Егоров*

*Аналитические и процедурные модели компоновки  
оборудования промышленных производств*

---

МОСКВА  
«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»  
2007

УДК 66.002.2  
ББК Н721.4-022.5-5-05  
Е30

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой компьютерно-интегрированных систем  
в химической технологии РХТУ им. Д.И. Менделеева  
***А.Ф. Егоров***

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Технологическое оборудование и  
пищевые технологии» ТГТУ

**С.И. Дворецкий**

***Егоров, С.Я.***

Е30 Аналитические и процедурные модели компоновки оборудования промышленных производств : монография / С.Я. Егоров. – М. : «Издательство Машиностроение-1», 2007. – 104 с. – 500 экз. – ISBN 978-5-94275-339-9.

В монографии рассмотрены вопросы автоматизированного проектирования наиболее сложного и трудоемкого этапа проектирования многоассортиментных производств – этапа определения рациональной компоновки производства, включающего в себя определение конфигурации и размеров цеха, а также оптимального расположения в нем оборудования технологических систем, трасс трубопроводов и трубопроводной арматуры. Приведены аналитические и процедурные модели основных задач этапа компоновки производства.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся компоновкой промышленных объектов, моделированием и оптимизацией процесса принятия проектных решений в данной области, а также аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

УДК 66.002.2  
ББК Н721.4-022.5-5-05

**ISBN 978-5-94275-339-9**

© Егоров С.Я., 2007  
© «Издательство Машиностроение-1»,  
2007

Научное издание

*Егоров СЕРГЕЙ ЯКОВЛЕВИЧ*

*Аналитические и процедурные  
модели компоновки  
оборудования промышленных  
производств*

Монография

Редактор Т.М. Глинкина  
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынова

Подписано в печать 1.02.2007  
Формат 60 × 84/16. 6,04 усл. печ. л.  
Тираж 500 экз. Заказ № 94

«Издательство Машиностроение-1»  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14  
Контактный телефон 8-4752-71-81-08

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ .....	6
1.1. Роль и место этапа компоновки оборудования в общей задаче проектирования многоассортиментных производств .....	7
1.2. Факторы, влияющие на компоновку оборудования .....	9
1.2.1. Способы транспортировки веществ и их влияние на компоновку оборудования .....	10
1.2.2. Основные правила и требования, предъявляемые к компоновке оборудования .....	11
1.3. Современные системы автоматизированного проектирования компоновки оборудования .....	15
2. ПОСТАНОВКА ОБЩЕЙ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ .....	19
2.1. Словесная постановка задачи компоновки .....	19
2.2. Математическое описание объектов компоновки .....	19
2.3. Аналитическая модель задачи компоновки .....	22
2.4. Методология решения задачи компоновки .....	25
3. ВЫБОР ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ЦЕХА ....	32
3.1. Выбор типа конструкции цеха и влияние его на компоновку оборудования .....	32
3.2. Постановка задачи выбора объемно-планировочных решений цеха .....	33
3.3. Аналитическая модель задачи выбора ОПР цеха .....	36
4. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В МНОГОЭТАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ .....	39
4.1. Постановка задачи оптимальной компоновки оборудования в многоэтажных производственных помещениях .....	39
4.1.1. Аналитическая модель проектного решения задачи размещения .....	42
4.1.2. Методы и алгоритмы решения задач размещения ...	44
4.1.3. Процедурная модель решения задачи размещения ...	46
4.2. Постановка задачи оптимальной трассировки технологических трубопроводов .....	47
4.2.1. Аналитическая модель проектного решения задачи трассировки .....	47
4.2.2. Методы и алгоритмы трассировки трубопроводов ...	49
4.2.3. Процедурная модель решения задачи трассировки трубопроводов .....	49
5. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЦЕХАХ АНГАРНОГО ТИПА .....	55
5.1. Постановка задачи оптимального размещения оборудования технологических систем в цехах ангарного типа .....	55
5.1.1. Аналитическая модель задачи размещения оборудования ТС в цехах ангарного типа .....	60
5.1.2. Процедурная модель решения задачи размещения оборудования ТС в цехах ангарного типа .....	62
5.2. Постановка задачи оптимальной трассировки трубопроводов .....	63
5.2.1. Аналитическая модель задачи трассировки трубопроводов ТС в цехах ангарного типа .....	63
5.2.2. Процедурная модель трассировки трубопроводов ...	68
6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР И РАЗМЕЩЕНИЕ ТРУ-	71

БОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ .....	71
6.1. Процедура выбора трубопроводной арматуры ....	71
6.1.1. Постановка задачи оптимального выбора трубопроводной арматуры .....	75
6.1.2. Процедура выбора трубопроводной арматуры .....	75
6.2. Аналитическая модель размещения трубопроводной арматуры	80
6.2.1. Критерий задачи размещения трубопроводной арматуры	83
6.2.2. Процедура решения задачи размещения арматуры ...	85
7. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ .....	87
7.1. Описание структуры системы компоновки оборудования производственных систем .....	87
7.1.1. Описание базы данных системы .....	87
7.1.2. Описание информационных потоков .....	93
7.1.3. Примеры компоновки оборудования в многоэтажных производственных помещениях и цехах ангарного типа	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	101

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений повышения эффективности функционирования многоассортиментных производств (МАП), в том числе производств с гибкой технологией (производства кино-фотоматериалов, лекарственных препаратов, красителей и добавок к материалам), является интенсификация использования средств вычислительной техники в процессе проектирования. В частности это касается этапа компоновки оборудования. Ряд отличительных особенностей производств данного класса: периодичность технологии, многостадийность и многоассортиментность производств, сложность химических реакций, широкое использование самотека материальных потоков, совмещенность наработки различных продуктов на одном технологическом оборудовании – делают этот этап одним из самых трудоемких в процессе проектирования.

Выбор оптимальных объемно-планировочных решений по компоновке оборудования невозможен традиционными ручными методами. Повышение качества проектных работ с одновременным сокращением сроков проектирования возможно только на основе широкого использования современной вычислительной техники в процессе поиска оптимальных проектных решений, что в свою очередь невозможно без разработки моделей, методов и алгоритмов для решения соответствующих задач. Кроме того, решение задач компоновки требует наличия обширной базы данных, содержащей справочную информацию о конструктивных решениях оборудования, используемого в производствах данного класса, а также информацию о типоразмерах труб и трубопроводной арматуре, что в свою очередь усложняет поиск оптимальных проектных решений.

В монографии рассмотрены вопросы наиболее сложного и трудоемкого этапа автоматизированного проектирования МАП – этапа определения рациональной компоновки производства, включающего в себя определение размеров цеха, а также оптимального расположения в нем оборудования технологических систем и трасс трубопроводов. Использование предложенных в работе аналитических и процедурных моделей компоновки поможет проектировщикам получать эффективные проектные решения в сжатые сроки, а также будет полезно при решении аналогичных задач в других отраслях промышленности.

## 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Проектирование химических производств – творческий, сложный, многообразный и трудоемкий процесс поиска оптимальных инженерно-технических решений в условиях неполной информации, представляющий собой взаимосвязанную совокупность нескольких организационных и инженерно-технических стадий [10].

Проектирование новых производств осуществляют на основе решений, принятых в утвержденных технико-экономических обоснованиях (ТЭО) или технико-экономических расчетах (ТЭР), в две организационные стадии: проект; рабочая документация или рабочие чертежи. Проектирование тиражируемых объектов выполняют, как правило, в одну стадию – рабочий проект.

Проектирование химических производств включает две взаимосвязанные инженерно-технические стадии [27]:

- 1) технологическое или функциональное проектирование;
- 2) конструкционное или монтажно-техническое проектирование.

В проекте подробно разрабатывают основные технические решения, принятые в техническом задании (ТЗ) на проектирование, в ТЭО (ТЭР) и в технологическом регламенте (ТР). Для проектируемого производства определяют его технико-экономические показатели и его сметную стоимость. В результате создания проекта разрабатывают технологическую схему производства; выбирают и рассчитывают все виды оборудования; составляют калькуляцию себестоимости готовой продукции и сметы на строительство проектируемого объекта; разрабатывают проекты вспомогательных сооружений.

В рабочем проекте определяют окончательные формы и размеры оборудования; осуществляют объемно-планировочное решение производства; разрабатывают всю техническую документацию, по которой ведется изготовление оборудования, монтаж и строительство объекта.

Основными задачами технологического или функционального проектирования химических производств являются: обоснование района строительства производства; разработка оптимальной технологической схемы; определение оптимальных технологических и конструкционных параметров аппаратов, а также выбор оптимальных технологических режимов, которые обеспечивают на спроектированном объекте выпуск заданного количества химических продуктов в соответствии со стандартами и технологическими условиями. Кроме того, на стадии технологического проектирования разрабатывают принципы автоматического управления отдельными процессами и производством в целом, а также методы аналитического контроля химико-технологических процессов.

Задачи технологического проектирования решают инженеры-технологи в основном при создании проекта.

Основные задачи конструкционного или монтажно-технического проектирования: выбор оптимального объемно-планировочного решения (компоновка) производства; выбор и разработка конструкций и чертежей технологического оборудования; оптимальное размещение оборудования в заданном объеме (или с его определением) производства; выбор конструкций и разработка трасс и чертежей технологических трубопроводов и инженерно-транспортных коммуникаций; разработка чертежей производственных и жилищно-хозяйственных зданий, а также составление монтажно-технологической документации, необходимой для строительства и пуска в эксплуатацию проектируемого объекта.

Компоновка, или объемно-планировочное решение производства – операция конструкционного проектирования химического производства, в результате которой определяют состав производственных помещений, их размеры и рациональное взаимное расположение, а также выполняют в определенном масштабе чертежи поэтажных планов и разрезов.

Важной операцией конструкционного проектирования является монтажная проработка производства, в результате которой решаются задачи размещения оборудования и трассировки внутрицеховых трубопроводов, создаются чертежи всех технологических трубопроводов и чертежи трубопроводной обвязки технологического оборудования проектируемого производства.

Задачи конструкционного проектирования решают инженеры различных специальностей (механики, конструкторы, строители, энергетики, электрики, сантехники, экономисты и др.) при активном творческом сотрудничестве с инженерами-технологами.

### 1.1. РОЛЬ И МЕСТО ЭТАПА КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ В ОБЩЕЙ ЗАДАЧЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Как было отмечено выше, задача нахождения оптимального варианта объемно-планировочных решений при проектировании производств является одной из наиболее трудоемких. Причем нахождение оптимального варианта предусматривает выбор наилучшего, с точки зрения того или иного критерия отбора, из всех допустимых, но на практике часто оказывается проблематичным найти хотя бы одно или несколько допустимых решений задачи в связи с множеством ограничений. Задачи компоновки технологического оборудования и трассировки технологических трубопроводов тесно связаны со многими задачами, входящими в общую цепочку проектирования производств (рис. 1.1).

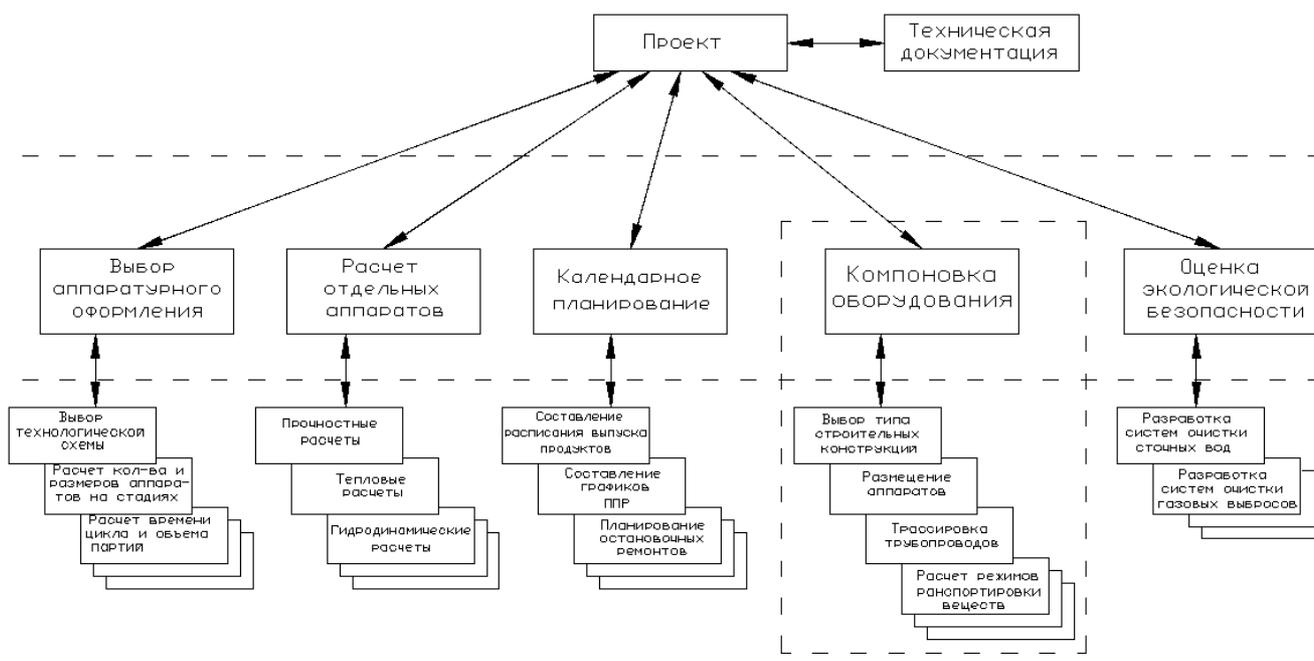


Рис. 1.1. Место этапа компоновки оборудования при проектировании химических производств

Так, для задач компоновки технологического оборудования и трассировки трубопроводов исходными данными являются результаты решения задач синтеза технологической схемы и расчета аппаратурного оформления, полученные на предыдущих этапах.

Выходными данными после решения задачи компоновки являются габаритные размеры цехов, координаты расположения оборудования и конфигурация трубопроводов, конфигурация площадок обслуживания и этажерок, а также расположение трубопроводной арматуры и контрольно-измерительных приборов. На основании этих данных разрабатываются монтажно-технологическая схема, электротехническая часть проекта, части водопровода и канализации, отопления и вентиляции, архитектурно-строительная часть и др.

При решении задачи компоновки технологического оборудования необходимо обеспечить условия функционирования технологической схемы, что в основном сводится к обеспечению транспортировки материальных потоков, а также условия монтажа и обслуживания оборудования и трубопроводов. Это обстоятельство делает особенно важными для решения задачи компоновки технологического оборудования вспомогательные расчеты, такие как гидравлические, прочностные и тепловые.

Гидравлические расчеты [27, 33, 38, 39] необходимы для выбора способа транспорта или оценки возможности транспортировки материальных потоков заданным способом (самотек, передавливание, насос), а также непосредственно для подбора насосов или компрессоров. Прочностные и тепловые расчеты [43, 47] необходимы для проверки трубопроводов на прочность при нагрузках от тепловых перепадов, подбора тепловой изоляции, определения тепловыделений в производственные помещения, подбора опор и крепежа для трубопроводов, расчета металлоконструкций под аппараты и т.д.

## **1.2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КОМПОНОВКУ ОБОРУДОВАНИЯ**

При монтажно-техническом проектировании производств необходимо учитывать комплекс факторов, которые в итоге формируют окончательный вариант компоновки оборудования и объемно-планировочных решений [27, 48].

К таким факторам в первую очередь относятся условия функционирования схемы. Такими условиями могут быть требования перепада высот между отдельными единицами оборудования, особенности транспортировки материальных потоков, необходимые уклоны трубопроводов и самотеков для транспортировки жидких и сыпучих материалов. Условия функционирования технологической схемы формируются, прежде всего, на основе технологического регламента данного производства и норм технологического проектирования для данного производства, а также на основе экспертных данных институтов и предприятий, занимающихся разработкой технологий данных производств.

Следующая группа факторов, влияющих на компоновочные решения, – это комплекс нормативной документации, которая разрабатывается головными институтами данной отрасли промышленности.

Комплекс нормативной документации служит для обеспечения безопасной и удобной работы людей на производстве, обслуживания, ремонта и монтажа оборудования и трубопроводных систем, а также мер по охране окружающей среды от загрязнений.

При проектировании производств существенную роль играет выбор типа конструкции производственных помещений, который определяется спецификой размещаемых производств, их производительностью и экономической целесообразностью.

Большое значение для нахождения оптимального варианта компоновки оборудования и трассировки технологических трубопроводов имеют гидравлические, тепловые и прочностные расчеты. Проведение этих расчетов при комплексной оптимизации компоновки оборудования позволит подобрать оптимальные гидродинамические режимы транспортировки веществ, устройства для транспортировки, тепловую изоляцию и конструкции для установки оборудования, крепежа трубопроводов и вспомогательного оборудования.

### **1.2.1. СПОСОБЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВЕЩЕСТВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОМПОНОВКУ ОБОРУДОВАНИЯ**

При проектировании производств одной из важнейших задач является обеспечение транспорта веществ между отдельными аппаратами технологической схемы. Выбор способа транспорта веществ и типа устройств зависит от физико-химических свойств и агрегатного состояния транспортируемой среды, от времени, за которое необходимо произвести транспортировку, от режима работы аппаратов (периодический, непрерывный), а также от экономической целесообразности. Большую роль при выборе способа транспортировки веществ играет обеспечение безопасности производства. Так, например, во взрывопожароопасных производственных помещениях всегда, когда возможно, транспорт обеспечивают самотеком. Насосное оборудование в таких производствах должно иметь электродвигатели с соответствующим исполнением, что значительно увеличивает его стоимость, в то время как самотечный способ транспорта не требует энергозатрат и является наиболее безопасным.

Газообразные вещества, такие как водяной пар, воздух и т.д., подаются из компрессорных установок, теплопунктов, котельных. Транспортировка осуществляется под действием избыточного давления, создаваемого компрессором или в коллекторах и котельных. Транспорт газообразных веществ может также осуществляться без искусственно создаваемого избыточного давления в результате разности плотностей транспортируемых веществ и окружающего воздуха (например, вытяжка CO<sub>2</sub> при брожении). Особенности осуществления транспортировки газообразных и парообразных веществ заключаются в необходимости съема конденсата из трубопроводов, в осуществлении мер безопасности для трубопроводов, работающих под высоким давлением и при транспортировке веществ с высокой температурой.

Жидкие вещества транспортируют самотеком, при помощи насосов или избыточного давления, создаваемого в аппарате нагревом, вводом инертного газа или пара (передавливание). Выбор способа транспорта жидких веществ производится по нескольким параметрам, таким как свойства жидкости (вязкость, плотность, наличие твердых частиц, токсичность и т.д.);

допустимость растворения в жидкости газов или паров, использующихся при передавлении; необходимое время транспорта и допустимая скорость жидкости в трубопроводе; экономическая целесообразность применения того или иного способа транспорта.

Часто приходится осуществлять транспортировку веществ, находящихся в твердом состоянии, а именно сыпучих материалов. Сырье, некоторые компоненты и конечный продукт часто представляют собой сыпучие материалы, гранулы, порошки и т.д. Транспортировку сыпучих материалов осуществляют гравитационным, пневматическим и гидравлическим способами. Выбор способа транспорта сыпучих материалов осуществляется исходя из его физико-химических свойств, допустимости контакта с жидкостями и газами, применяемыми для гидравлического и пневматического транспорта, допустимости ударов при гравитационном спуске материалов, а также исходя из экономической целесообразности.

## 1.2.2. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОМПОНОВКЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Приведенные ниже правила размещения оборудования отражают неформальный характер требований к размещению оборудования, вытекающих из требований нормативной документации: ГОСТ [6 – 12], НПБ [37 – 39], СНИП [43 – 47], а также особенностей технологии, правил техники безопасности, обслуживания оборудования и др. [2, 13, 26, 27, 36, 42, 49]. Для удобства они объединены в отдельные блоки правил.

### **Группировка оборудования по отделениям:**

– Однотипные аппараты одинакового производственного назначения (например, нитраторы, сульфураторы, выпарные и другие аппараты), выполняющие сходные технологические функции, целесообразно объединить в специализированные агрегаты. Это обеспечивает взаимную заменяемость аппаратов и удобство их обслуживания (загрузка из одних мерников, однотипность контроля и обслуживания аппаратов работниками одинаковой квалификации).

– В одном помещении не следует объединять оборудование с различными по категориям выделениями. В противном случае приходится, например насос, перекачивающий воду, но расположенный рядом с углеводородным насосом, снабжать более дорогим взрывобезопасным электродвигателем.

– Вибрирующее оборудование (компрессоры, особенно поршневые, вентиляторы, насосы, дробилки и другие машины, а также аппараты, в которые подается острый пар или большие потоки газа) объединяют и размещают на массивных фундаментах, тщательно изолируемых от соседних строительных конструкций.

### **Общие требования к размещению оборудования:**

– Обеспечить возможность монтажа и демонтажа оборудования в монтажные проемы или временные монтажные проемы в окнах.

– Аппараты должны быть снабжены обслуживающими площадками с тех сторон, откуда ведется обслуживание аппарата, в том числе для обслуживания штуцеров КиП и другой трубопроводной арматуры.

– Над всеми провисающими аппаратами должны быть размещены монорельсы, даже если в аппарате нет привода.

– Над штуцерами КиП, где вытаскиваются гильзы, пьезотрубки, повторители давления, необходимо предусматривать закрытые монтажные проемы.

– Технологическое оборудование, создающее на рабочих местах вибрацию и шум, рекомендуется устанавливать на специальных фундаментах или амортизаторах.

– Аппараты с высоко расположенными люками, штуцерами, перемешивающими устройствами, крышками, обслуживание которых ведется со специальных площадок, должны размещаться так, чтобы их можно было использовать в качестве опор для этих площадок. Лестницы на площадки обслуживания должны устанавливаться под углом 45°.

– В качестве основных проходов и проездов в цехе целесообразно использовать перекрытия каналов, проходящих вдоль цеха.

### **Правила компоновки, вытекающие из требований ремонта:**

– Чистка составляет основную часть ремонтных работ. Теплопередающие поверхности чистят от накипи, шлака, смол; реакционные котлы – от остатков переработанных веществ; ректификационные колонны, сборники, отстойники также подлежат периодической чистке. В процессе чистки приходится разбирать оборудование, открывать люки, извлекать трубы, что требует соответствующей производственной площади.

Поэтому при компоновке необходимо предусмотреть достаточную рабочую площадь вокруг аппаратов, а также соответствующие подъемники нужной грузоподъемности (монорельсы с таями, кран-балки).

– Устранение неплотностей во фланцах, муфтах, сальниках движущихся частей машин, запорной и регулирующей арматуре, припуски из-за нарушения развальцовки трубок в трубных решетках, разрушение оболочек и стенок труб вследствие коррозии – все эти мелкие работы по ремонту проводят, как правило, на месте, что тоже требует места.

– Восстановление изоляционных и антикоррозионных покрытий (гуммирование, футеровка, окраска, термоизоляция) требует зачастую подвоза большого количества материалов, что заставляет выносить такие аппараты на край цеха и обеспечивать их удобными подъездными путями для автокранов и машин.

### **Влияние агрессивности среды на размещение оборудования:**

– Емкостная аппаратура с агрессивными, токсичными и горючими жидкостями, расположенная в цехе, должна иметь устройство для слива этих жидкостей в аварийную емкость (независимо от возможности откачки их насосом).

– Для аппаратов, из которых в процессе работы выделяются вредные пары, газы и пыль, необходимо предусматривать изолированные помещения, со своим выходом наружу или выходом через тамбуры-шлюзы.

– Емкости и аппаратура с горючими или едкими жидкостями должна располагаться на поддонах или на глухой части перекрытия, ограниченной бортом высотой не менее 150 мм.

### **Условия, определяющие размещение оборудования по этажам цеха:**

- На первом этаже обычно устанавливают сырьевые емкости, аппараты для растворения и подготовки сырья, здесь же располагается отделение упаковки готовых продуктов. Сырьевые емкости, как правило, тяжелые аппараты и должны устанавливаться на фундаментах. Размещение таких аппаратов на верхних этажах требует увеличения прочности строительной конструкции и, следовательно, ведет к ее удорожанию.
- На верхних этажах устанавливают, как правило, реакционную аппаратуру, размещая ее на междуэтажных перекрытиях или с провисанием через перекрытие.
- Часть аппаратов размещается непосредственно друг под другом, что вызвано характером транспортировки веществ между этими аппаратами (транспортировка твердых и пастообразных веществ).
- Кожухотрубчатые теплообменники длиной до 2 м нельзя провешивать в перекрытии, так как штуцеры теплообменника попадают в перекрытие и доступ к ним затруднен.
- Все крупногабаритное тяжелое оборудование должно быть установлено как можно ниже. С этой целью иногда целесообразно менять самотечную систему подачи орошения на принудительную, размещая дефлегматоры на первом или втором этаже.
- Оборудование, нуждающееся в частом ремонте, чистке, регулировке также желательно размещать на 1-2 этаже.

#### **Требования к размещению на этажах:**

- Размещаемые аппараты должны образовывать вертикальные и горизонтальные ряды с одним или несколькими проходами.
- Не рекомендуется выдвигать аппараты из общего ряда, так как это может помешать прокладке пучков труб, подвешиваемых под перекрытием (особенно на нулевой отметке).
- Расстояния между аппаратами должны быть не менее 1,5 м по фронту обслуживания; не менее 1 м между выступающими частями оборудования (с учетом лап, теплоизоляции и ограждающих бортиков), не менее 0,8 м от стен цеха (если нет обслуживания). Исключение составляют агрегаты: два насоса на одном фундаменте; аппарат и мерники; аппарат и теплообменник; колонна и куб.
- Необходимо предусматривать свободные площадки для узлов КиП и оборудования смежников (ОиВ, ВКТМ).
- Предусматривать проезды электропогрузчиков к аппаратам (ширина проезда 2,1 м, высота 2,5...3 м, разворот 360°).
- Следить, чтобы эвакуационные проходы были прямолинейными и не загромождались оборудованием.
- Не забывать про тамбуры, отделяющие помещения с разными категориями.
- Машины, расположенные против дверей, должны находиться от них на расстоянии не менее 2 м.
- Через каждые 40...50 м (в длинном цехе) рекомендуется предусматривать монтажные площадки длиной 6...12 м, на которых впоследствии можно будет установить дополнительное оборудование.
- При установлении ширины проходов необходимо, с учетом действующих норм, создать возможность свободного маневрирования напольного и подвешного транспорта в цехе.
- Предусмотреть площади для хранения сырья и промежуточных продуктов, деталей аппаратов (на время ремонта). Резервные площади предусматриваются при необходимости последующего увеличения мощности производства.
- Следует учитывать обвязку аппаратуры трубопроводами и установки КИП и средств автоматизации. При большом числе реализующих клапанов и запорной арматуры с механическими приводами площадь, занимаемая обвязкой, иногда составляет 40...50 % общей площади производственного помещения.
- Аппараты, в которых осуществляется визуальный контроль качества продукции, предпочтительно устанавливать в зонах с естественной освещенностью, достаточной для произведения такого контроля.
- Закрытые монтажные проемы задавать во всех отделениях с размерами по максимальным габаритам аппаратов.
- При установке аппарата ориентировать его по расположению люка для осмотра.
- При установке колонной аппаратуры необходимо следить, чтобы фланцы, люки осмотра, штуцеры не попадали в перекрытия. Если люки не обслуживаются с этажа, то надо предусматривать площадки для их обслуживания.
- Над барабанно-вакуумными фильтрами давать два монорельса по цапфам фильтра и предусматривать место для ремонта барабана.
- При установке аппаратов, работающих под давлением, следует руководствоваться «Правилами устройства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением» [38]. Установка аппаратов должна исключать возможность их опрокидывания; должен быть обеспечен доступ ко всем частям аппарата; для удобства обслуживания, осмотра и ремонта должны быть установлены площадки и лестницы, которые не должны нарушать устойчивость аппарата.

Эти и множество других правил и требований, которые надо учесть в процессе компоновки оборудования, носят трудно формализуемый характер, что значительно затрудняет решение задачи размещения с использованием ЭВМ.

### **1.3. СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ**

В настоящее время существует ряд программных средств, предназначенных для автоматизации инженерного проектирования объектов химической промышленности [4, 28, 32, 34, 41, 51]. Среди них можно выделить следующие системы: PDS (Integrath); PDMS (Cadcentre); CADPIPE (AEC Design Group); CADWORX (COADE); AutoPLANT (Rebis); PLANT-4D (CEA Technology).

CADWORX фирмы COADE и CADPIPE (разработка AEC Design Group) сложны в освоении и не могут быть адаптированы на российском рынке без вмешательства разработчиков. То же относится и к системе PlantSpace (Jacobus Technology), работающей на основе Microstation.

PDS и PDMS фирм Integraph и Cadcentre – мощное программное обеспечение, позволяющее проектировать с учетом не только стандартов, но и СНиП. Однако сложная адаптация систем может растянуться на годы, не принося никакой отдачи, а высокая стоимость PDS и PDMS делает их в российских условиях практически некупаемыми.

Среди наиболее подходящих для российского пользователя остаются AutoPLANT (Rebis) и PLANT-4D (CEA Technology) – в общих чертах функциональные возможности этих систем схожи. Рассмотрим более подробно одну из них – PLANT-4D.

Разработчиком PLANT-4D является голландская компания CEA-Technology. Ее центральный офис находится в Роттердаме. Компания существует более 12 лет. В России и на территории стран бывшего СССР все права на распространение PLANT-4D принадлежат российской компании Consistent Software.

PLANT-4D полностью настроен для работы на русском языке: переведены меню, панели инструментов, командная строка, написаны учебные пособия (с учетом российской специфики). Кроме того, созданы техническая поддержка на русском и специализированный Internet-сайт (<file://www.plant4d.ru>).

Базы данных для PLANT-4D предусматривают работу по российским государственным, отраслевым и корпоративным стандартам. Эти базы составлены специалистами в области проектирования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств, а также людьми, имеющими богатый опыт работы с системами автоматизированного проектирования и адаптации таких систем.

В России PLANT-4D используется на предприятиях нефтегазовой и химической, фармацевтической, металлургической промышленности, в топливно-энергетическом комплексе, а также в организациях, осуществляющих лицензирование технологических установок и систем.

Среди пользователей PLANT-4D – такие именитые российские компании, как ЮКОС, «Норильский Никель», «Славнефть», СИДАНКО, МОСЭНЕРГО, КИНЕФ, Harris Group, БИГОР, Grasso International (GEA) и др. Пользователями являются и небольшие фирмы, специализирующиеся в области проектирования.

В технологической линейке на основе PLANT-4D имеется широкий набор расчетных программ. Среди них:

**СТАРТ** – программа расчета прочности и жесткости разветвленных пространственных трубопроводов различного назначения при статическом нагружении. Алгоритмы программы СТАРТ соответствуют методикам и нормам расчета энергетических установок (согласно РД 10-249–98), тепловых сетей (согласно РД 10-400–01), нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (согласно РТМ 38.001–94), магистральных газо- и нефтепроводов (согласно СНиП 2.05.06–85).

СТАРТ имеет обязательный сертификат соответствия Госстроя РФ и рекомендации Госгортехнадзора.

**ГИДРОСИСТЕМА** – программа, созданная российскими разработчиками. Она позволяет осуществлять выбор диаметров разветвленных трубопроводов, перекачивающих жидкости или газы, определять пропускную способность системы или проводить поверочный гидравлический расчет.

**ПРЕДКЛАПАН** – программа расчета требуемого проходного сечения клапана; определения свойств продукта по заданному составу; подбора марки и числа клапанов, а также пружины, груза или исполнения из базы данных; гидравлического расчета подводящего и отводящего трубопроводов и проверки допустимости гидравлических потерь; выпуска проектной документации (экспликация, спецификации), а также подробного протокола расчета – по корректируемым пользователем формам; проверки вариантов установки клапанов различных марок, поверочного расчета ранее установленных клапанов. Программа соответствует ГОСТ 12.2.085–82 и согласована с Госгортехнадзором России.

**ИЗОЛЯЦИЯ** – программа расчета теплоизоляции трубопроводов, арматуры и оборудования. Осуществляет выбор материалов теплоизоляции; расчет толщины, объема и поверхности изоляции, выбор конструкции; расчет объемов работ и расходов основных и вспомогательных материалов; выпуск техномонтажной ведомости, ведомости объемов работ и ведомости потребности в материалах для стандартного и нестандартного оборудования, трубопроводов наземных и подземных, со спутниками и без них, арматуры.

**ПВ-БЕЗОПАСНОСТЬ** – программа расчета энергопотенциалов и категорий взрывоопасности технологических установок (ОПВБ). Осуществляет расчет избыточного давления взрыва. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности (НПБ 105–95). Расчет радиусов разрушений. Нормативные показатели ПВО для 7000 веществ. Свидетельство Госгортехнадзора РФ № 02-35/255 от 16.09.1999.

**CAESAR II** – единственный в мире инженерный инструмент, который осуществляет полный анализ системы трубопроводов, включающий статический и динамический расчет системы любого размера и сложности. Применение этого программного продукта в России ограничено отсутствием в нем соответствия отечественным нормативным документам и методикам, но он используется при обслуживании зарубежных контрактов и проектировании зарубежных объектов. Впрочем, для проектирования таких объектов рекомендуются также программные продукты, разработанные CEA и COADE для расчета сосудов и аппаратов по ASME, BS, UBC, ASCE, ANSI, TEMA, WRC, NBC, WRCB, WRC, DIN, CODAP, ESPACE, SCADES и др.

Так что для специалиста PLANT-4D и технологическая линейка на его основе являются инструментами, которые увеличивают производительность, сокращают число ошибок, позволяют повысить качество проектной документации, снимают бремя утомительных рутинных работ и позволяют уделить большее время поиску творческих инженерных решений.

Анализируя существующие системы, мы видим, что автоматизированное решение различных задач, в том числе компоновки оборудования и трассировки трубопроводов, основано в большей мере на человеческом факторе – на способности человека создать, проанализировать и принять правильное проектное решение. Однако для выбора единственного варианта иногда надо проанализировать тысячи альтернативных вариантов, что невозможно без их автоматизированного синтеза и анализа.

Именно эти вопросы – *автоматизированный синтез* различных вариантов проектных решений компоновки оборудования, а также поиск среди них лучшего и являются предметом рассмотрения в настоящей работе.

## 2. ПОСТАНОВКА ОБЩЕЙ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

### 2.1. СЛОВЕСНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КОМПОНОВКИ

Содержательная (словесная) постановка задачи компоновки может быть сформулирована следующим образом: *определить с учетом всех правил, требований и ограничений такое пространственное расположение оборудования технологических систем (ТС) с заданной структурой технологических связей и такие габариты производственного помещения, при которых затраты на проектируемый объект были бы минимальными.*

Для математической записи задачи потребуется выполнить как минимум три этапа: описать объекты компоновки, предложить критерий и разработать математическую модель.

### 2.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ КОМПОНОВКИ

Выполнение проекта компоновки связано с определением пространственного расположения в цехе всех элементов ТС, важнейшими из которых являются оборудование схемы и связующие его коммуникации. При этом, поиск оптимального варианта компоновки связан с анализом множества возможных вариантов размещения оборудования и прокладки трасс технологических коммуникаций, каждый из которых должен быть проверен на соответствие ограничениям математической модели, среди которых есть условия непересечения объектов компоновки, их взаимного расположения и ряд других, связанных с геометрической формой размещаемых объектов. Поэтому от того, как будут описаны объекты компоновки, во многом зависит время решения задачи и качество самих решений. В работе приняты следующие допущения.

**Допущение 1.** Рассматривается прямоугольная система координат  $XYZO$  с метрикой пространства  $\rho$ , выбор которой обусловлен требованием прокладки технологических коммуникаций по координатным осям:

$$\rho(c', c'') = |X_{c'} - X_{c''}| + |Y_{c'} - Y_{c''}| + |Z_{c'} - Z_{c''}|,$$

где  $\rho(c', c'')$  – расстояние между двумя точками  $c'$  и  $c''$  пространства  $XYZO$ .

**Допущение 2.** Размещаемые объекты аппроксимируются простейшими геометрическими фигурами или их комплексами. Причем, количество и вид используемых простейших геометрических фигур для аппроксимации зависят от конфигурации объекта компоновки. Пространственное положение  $i$ -го объекта в простейшем случае задается вектором  $A_i = (X_i, Y_i, Z_i, Q_i)$ , где  $X_i, Y_i, Z_i$  – координаты центра основания аппроксимирующей фигуры, а  $Q_i$  – угол поворота объекта относительно его начального положения. Такое описание объектов целесообразно использовать при предварительной компоновке объектов, например, при решении задачи размещения.

Более сложные описания объектов применяются на этапах уточнения компоновочных решений, когда решаются совместные задачи размещения объектов и прокладки связующих коммуникаций.

**Допущение 3.** В ряде случаев приходится осуществлять компоновку блоков, в состав которых входят разнотипные объекты (аппараты, насосы, трубопроводы, арматура). Компоновку элементов таких блоков будем рассматривать как отдельную задачу. В рамках же общей задачи компоновки такие блоки целесообразно описывать как единый размещаемый элемент.

**Допущение 4.** Геометрическое описание связующих коммуникаций целесообразно осуществлять с помощью цилиндров, что не вызывает больших сложностей с проверкой условий непересечения объектов. Для связующих коммуникаций, так же как и для размещаемых объектов, целесообразно использовать несколько уровней сложности их описания в зависимости от детализации проработки проекта.

При решении задачи размещения оборудования ТС пространственное расположение  $j$ -го трубопровода (трассы)  $j = 1, 2, \dots, L$  зададим вектором  $T_j = (X_{j0}, Y_{j0}, Z_{j0}, X_{j1}, Y_{j1}, Z_{j1}, \dots, X_{jK_j}, Y_{jK_j}, Z_{jK_j})$ , где  $L$  – число технологических связей между оборудованием;  $X_{j0}, Y_{j0}, Z_{j0}$  – координаты начала трассы;  $X_{jK_j}, Y_{jK_j}, Z_{jK_j}$  – координаты конца трассы;  $X_{jM}, Y_{jM}, Z_{jM}$ ,  $M = \overline{1, K_j - 1}$  – координаты точек изломов трассы;  $K_j$  – число прямоугольных фрагментов в трассе  $j$ .

При решении задачи трассировки, кроме простого соединения объектов, часто приходится иметь дело с разветвленными соединениями. В этом случае целесообразно использовать более детальное описание связующих коммуникаций, основанное на использовании «узлов» и «участков». Под узлом будем понимать точку пересечения (соединения) двух или более участков связующих коммуникаций с помощью любых из применяемых в промышленности способов их соединения. Под участком – совокупность всех элементов, входящих в состав соединения, соединяющего любые два узла. Данный способ описания систем разветвленных технологических коммуникаций позволяет оперировать всеми ее элементами (участками, местами соединения трубопроводов, арматурой и т.д.).

**Допущение 5.** Металлоконструкции, лестницы и другие строительные элементы, а также зоны обслуживания объектов компоновки, проходы и проезды в цехе будем описывать простейшими геометрическими фигурами (параллелепипед, цилиндр) в зависимости от их конфигурации.

С учетом введенных допущений задача компоновки оборудования формулируется следующим образом.

Найти

$$h^* = \arg \min \{S(h) | h \in H = m(D)\}, \quad (2.1)$$

где  $h = (AP, TR, CK, M, AR)$  – вариант компоновки;  $AP = \{AP_i | i = \overline{1, N}\}$  – вариант размещения оборудования;  $TR = \{TR_j | j = \overline{1, L}\}$  – вариант трассировки трубопроводов;  $CK = (X_c, Y_c, Z_c)$  – вариант строительной конструкции;  $M = \{M_i | i = \overline{1, N}\}$  – вариант металлоконструкций под оборудование;  $AR = \{AR_j | j = \overline{1, L}\}$  – вариант расположения трубопроводной арматуры;  $H$  – множество допустимых вариантов компоновки;  $D$  – множество всех возможных вариантов компоновки;  $D = D_{AP} \times D_{TR} \times D_{CK} \times D_M \times D_{AR}$ ;  $D_{AP} = \{AP^{q1} | q1 = \overline{1, |n1|}\}$ ;  $D_{TR} = \{TR^{q2} | q2 = \overline{1, |n2|}\}$ ;  $D_{CK} = \{CK^{q3} | q3 = \overline{1, |n3|}\}$ ;  $D_M = \{M^{q4} | q4 = \overline{1, |n4|}\}$ ;  $D_{AR} = \{AR^{q5} | q5 = \overline{1, |n5|}\}$ ;  $D_{AP}, D_{TR}, D_{CK}, D_M, D_{AR}$  – множества всех возможных вариантов размещения оборудования, трассировки трубопроводов, размеров цеха, внутренних строительных конструкций (металлоконструкций), размещения арматуры;  $|n1|, |n2|, |n3|, |n4|, |n5|$  – мощности множеств  $D_{AP}, D_{TR}, D_{CK}, D_M, D_{AR}$ ;  $m$  – аналитическая модель проектного решения.

В качестве целевой функции предложен критерий приведенных затрат, включающий в себя составляющие капитальных и эксплуатационных затрат, зависящих от решений по компоновке оборудования:

$$S = SK E_n + SE = \sum_{i=1}^6 SK_i E_n + \sum_{j=1}^3 SE_j; \quad (2.2)$$

где  $S$  – критерий оптимальности (приведенные затраты);  $SK, SE$  – капитальные и эксплуатационные затраты;  $E_n$  – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений.

К капитальным затратам ( $SK$ ) относятся: стоимость монтажа оборудования ( $SK_1$ ); стоимость металлоконструкций ( $SK_2$ ); стоимость строительных конструкций цеха ( $SK_3$ ); стоимость транспортных трубопроводных сетей ( $SK_4$ ); стоимость устройств для транспортировки веществ (насосы, компрессорные установки) ( $SK_5$ ); стоимость трубопроводной арматуры ( $SK_6$ ).

$$SK = SK_1 + SK_2 + SK_3 + SK_4 + SK_5 + SK_6, \text{ р.} \quad (2.3)$$

К эксплуатационным затратам ( $SE$ ) относятся: стоимость электроэнергии, затрачиваемой на транспортировку веществ ( $SE_1$ ); потери тепловой энергии от трубопроводов ( $SE_2$ ); затраты на ремонт оборудования ( $SE_3$ ).

$$SE = SE_1 + SE_2 + SE_3, \text{ р./год.} \quad (2.4)$$

### 2.3. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ КОМПОНОВКИ

Аналитическая модель проектного решения компоновки включает следующие блоки ограничений:

#### Блок 1. Конструкционные ограничения модели:

– Ограничение на предельно допустимые размеры цеха:

$$X_c^{\min} \leq X_c \leq X_c^{\max}; \quad Y_c^{\min} \leq Y_c \leq Y_c^{\max}; \quad Z_c^{\min} \leq Z_c \leq Z_c^{\max}. \quad (2.5)$$

– Кратность размера цеха размеру строительного модуля:

$$X_c/n_x = Y_c/n_y = Z_c/n_z = \text{const}. \quad (2.6)$$

– Размещение оборудования внутри цеха:

$$K(A_i) \in K(X_c, Y_c, Z_c), \quad \forall i = \overline{1, N}. \quad (2.7)$$

– Наличие зон для движения транспортных устройств:

$$L_{C_j^{\text{тп}}} \geq L_{\min}^{\text{тп}}, \quad B_{C_j^{\text{тп}}} \geq B_{\min}^{\text{тп}}, \quad j \in \overline{1, J_{\text{тп}}}, \quad (2.8)$$

где  $L$  и  $B$  – длина и ширина зоны движения.

– Наличие зон для ремонта и обслуживания оборудования:

$$C_j^{\text{обс}}, \quad j \in \overline{1, J} \text{ – количество аппаратов.} \quad (2.9)$$

– Зоны свободные от размещаемого оборудования:

$$C_j^{\text{св}}, \quad j \in \overline{1, J_{\text{св}}} \text{ – количество зон.} \quad (2.10)$$

– Зоны под каналы для прокладки трубопроводов:

$$C_j^{\text{к}}, \quad j \in \overline{1, J_{\text{к}}} \text{ – количество зон под каналы.} \quad (2.11)$$

#### Блок 2. Ограничения на размещение оборудования:

– Тяжелое оборудование размещается, как правило, на нижних этажах:

$$K(A_j) \in K(C_k^H), \quad j \in \overline{1, J_T}. \quad (2.12)$$

– Размещение однотипного оборудования в один ряд:

$$z_{i1} = z_{i2}, \quad (y_{i1} = y_{i2}) \vee (x_{i1} = x_{i2}), \quad \forall i_1, i_2 \in A^{\text{ряд}}. \quad (2.13)$$

– Изолированное размещение оборудования:

$$K(A_j) \in K(C_k^{\text{из}}), \quad j \in \overline{1, J_{\text{из}}}. \quad (2.14)$$

– Фиксация размещения отдельных аппаратов:

$$x_i = \text{const} \wedge y_i = \text{const} \wedge z_i = \text{const}, \quad \forall i \in A^\Phi. \quad (2.15)$$

– Обеспечение требуемого расстояния между аппаратами:

$$\rho(A_i, A_k) \geq [\rho 1]_{ik}, \quad i \neq k. \quad (2.16)$$

– Расстояние между аппаратами и строительными конструкциями:

$$\rho(U_i, SK) \geq [\rho 2]_i, \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (2.17)$$

### Блок 3. Ограничения на прокладку трасс трубопроводов:

– Ортогональность фрагментов трубопроводов в пространстве:

$$\begin{aligned} (x_{jn+1} - x_{jn})(y_{jn+1} - y_{jn}) = 0 \vee (x_{jn+1} - x_{jn})(z_{jn+1} - z_{jn}) = 0 \vee \\ \vee (y_{jn+1} - y_{jn})(z_{jn+1} - z_{jn}) = 0, \quad \forall n \in \{0, 1, \dots, k_j - 1\}, \quad j = 1, \dots, L. \end{aligned} \quad (2.18)$$

– Прокладка трасс трубопроводов в выделенных зонах:

$$K(T_j) \in K(C^k) \in K(X_c, Y_c, Z_c), \quad \forall j = \overline{1, L}. \quad (2.19)$$

– Обеспечение зазоров между трассами:

$$\rho(T_i, T_j) \geq [\rho 3]_{ij}, \quad i = 1, \dots, L, \quad j = 1, \dots, L, \quad i \neq j. \quad (2.20)$$

– Расстояние между фрагментами трасс и аппаратами:

$$\rho(A_i, T_j) \geq [\rho 4]_{ij}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, L. \quad (2.21)$$

– Расстояние между трассами и строительными конструкциями:

$$\rho(C_k^{\text{кон}}, T_j) \geq [\rho 5]_{kj}, \quad k = 1, \dots, NK, \quad j = 1, \dots, L. \quad (2.22)$$

### Блок 4. Технологические ограничения:

– Часть оборудования рекомендуется размещать друг над другом:

$$x_{i1} = x_{i2}, \quad y_{i1} = y_{i2}, \quad \forall i_1, i_2 \in A^{\text{стояк}}. \quad (2.23)$$

– Изолированное размещение оборудования в отделениях:

$$\rho(A_{j_1}, A_{j_2}) \leq \delta_{\text{отдел}}^{\text{max}}, \quad \forall j_1, j_2 \in A^{\text{отдел}}. \quad (2.24)$$

– Ограничение на длину трубопроводов с вязкими жидкостями:

$$\rho(A_{j_1}, A_{j_2}) \leq \delta_{\text{вязк}}, \quad \forall j_1, j_2 \in A^{\text{вязк}}. \quad (2.25)$$

– Обеспечение требуемой скорости потока в трубопроводах:

$$\omega_j^H \leq \omega_j \leq \omega_j^B, \quad \forall j = 1, \dots, L. \quad (2.26)$$

– Ограничение на время загрузки-выгрузки оборудования:

$$\tau_{j \text{ min}} \leq \tau_j \leq \tau_{j \text{ max}}. \quad (2.27)$$

– Обеспечение транспорта самотеком:

$$\Delta Z = z_i - z_j \geq \sum h = h_1 + h_2 = \lambda \frac{L\omega^2}{2dg} + \sum \xi \frac{\omega^2}{2g}, \quad (2.28)$$

$$i = 1, \dots, N; \quad j = 1, \dots, N; \quad i \neq j.$$

– Исключение застойных зон для жидкостей:

$$\min \{z_{jn_1} - z_{jn_2}; z_{jn_3} - z_{jn_2}\} \leq 0; \quad (2.29)$$

– для газов:

$$\min \{z_{jn_2} - z_{jn_1}; z_{jn_2} - z_{jn_3}\} \leq 0, \quad (2.30)$$

$$\forall j \in M^r, \quad \forall n_1, n_2, n_3 \in \{0, 1, 2, \dots, k_j\}: n_1 > n_2 > n_3.$$

Кроме этих условий в эту группу включены условия обеспечения транспорта с помощью насосов и перекачивания, а также условия, обеспечивающие прочность и безопасность оборудования и трубопроводов.

#### Блок 5. Условия непересечения объектов:

– Непересечение аппаратов друг с другом:

$$K(A_{i_1}) \cap K(A_{i_2}) = \emptyset, \quad i_1, i_2 = \overline{1, N}, \quad i_1 \neq i_2. \quad (2.31)$$

– Непересечение аппаратов со строительной конструкцией:

$$K(A_i) \cap K(C_j^{\text{кон}}) = \emptyset, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, J_{\text{кон}}}. \quad (2.32)$$

– Непересечение оборудования со вспомогательными зонами:

$$K(A_i) \cap K(C_j^{\text{всп}}) = \emptyset, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, J_{\text{всп}}. \quad (2.33)$$

– Непересечение трасс друг с другом:

$$K(T_i) \cap K(T_j) = \emptyset, \quad i = 1, \dots, L, \quad j = 1, \dots, L. \quad (2.34)$$

– Непересечение трасс с аппаратами:

$$K(T_i) \cap K(A_j) = \emptyset, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, L. \quad (2.35)$$

– Непересечение трасс со строительными конструкциями:

$$K(T_j) \cap K(C_k^{\text{кон}}) = \emptyset, \quad j = 1, \dots, L, \quad k = 1, \dots, K_{\text{кон}}. \quad (2.36)$$

– Трассы не должны проходить в зонах обслуживания оборудования:

$$K(T_j) \cap K(C_c^{\text{обсл}}) = \emptyset, \quad j = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C_{\text{обсл}}. \quad (2.37)$$

И еще ряд других ограничений подобного свойства, описывающих взаимное непересечение объектов компоновки.

Варьируя ограничениями модели (2.5) – (2.37) задачи компоновки и видоизменяя целевую функцию (2.2), можно из исходной постановки получить практически любую частную постановку задачи, встречающуюся на этапе принятия объемно-планировочных решений производства. Так, задачи размещения оборудования ХТС по этажам или на этажах [22] и задачи трассировки технологических трубопроводов [17], рассматриваемые далее, получаются путем модификации соответствующих ограничений (2.12) – (2.17) и (2.18) – (2.22) модели задачи компоновки.

Задачи компоновки в многоэтажном промышленном здании [15] и в цехах ангарного [30] типа получаются из исходной путем задания конструктивных ограничений (2.5) – (2.11), соответствующих типу строительной конструкции и частичному видоизменению критерия (2.2).

## 2.4. МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОМПОНОВКИ

Учитывая, что задача поиска оптимальных компоновочных решений производства – это сложная, многоуровневая, итерационная процедура принятия проектных решений, нельзя рассчитывать на ее легкое и однозначное решение. Многими авторами доказано, что подобные задачи относятся к классу NP-полных задач математического программирования. Затраты машинного времени в таких задачах растут в соответствии с  $n!$  или  $e^n$ , что приводит при сравнительно небольшом увеличении размерности задачи  $n$  к резкому его возрастанию, превышающему предел возможностей даже самого современного компьютера. Обычно, для задач размещения поиск точного решения возможен лишь для числа размещаемых объектов, исчисляемого в 20 – 30 единиц. Лишь в некоторых случаях, когда модель и критерий упрощаются, удается найти точное решение для большего числа размещаемых объектов. Так, в работе [50] задача сводится к задаче линейного программирования и сообщается о ее решении для 30 – 40 объектов.

Поэтому, наиболее целесообразным путем решения задачи компоновки является ее разбиение на ряд взаимосвязанных задач меньшей размерности, имеющих самостоятельное значение в проектной практике, с последующим итерационным решением каждой из них. Решение задачи компоновки предлагается проводить по схеме, представленной на рис. 2.1.

В блоке 1 на основе анализа исходных данных об оборудовании ХТС, структуре технологических связей между аппаратами схемы, способах транспорта, физико-химических свойствах веществ, данных расчетов материальных балансов, стоимости земли и другой информации, хранящейся в базе данных проекта, определяются тип строительной конструкции, количество помещений, их размер и категоричность.

Основным назначением данного блока является получение оценочных значений размеров производственного помещения. Критерий (2.2) в этом блоке вычисляется по ряду упрощенных эмпирических формул, полученных при исследовании стоимостных составляющих (2.3) и (2.4) критерия (2.2). Так, стоимость трубопроводов на этом этапе не может быть точно

определена, так как еще неизвестны диаметры трубопроводов, расположение оборудования и трасс трубопроводов. Поэтому в качестве оценки длины соединений на этом этапе используются формулы, позволяющие оценить возможную минимальную длину трубопроводов в зависимости от структуры соединений ХТС, типа и размеров строительной конструкции, используемой для компоновки. Стоимость строительной конструкции определяется в зависимости от ее размеров, этажности, стоимости земли. Общий объем помещения пропорционален объему, занимаемому оборудованием с учетом зон обслуживания и мест для последующей трассировки трубопроводов.

Далее, в зависимости от принятого решения решается одна из задач: компоновка оборудования в многоэтажных цехах (блок 2) или задача компоновки в цехах ангарного типа (блок 3). Каждая из этих задач, в свою очередь, разбивается на два блока: размещение оборудования (блоки 5, 8) и трассировки трубопроводов (блоки 6, 7).

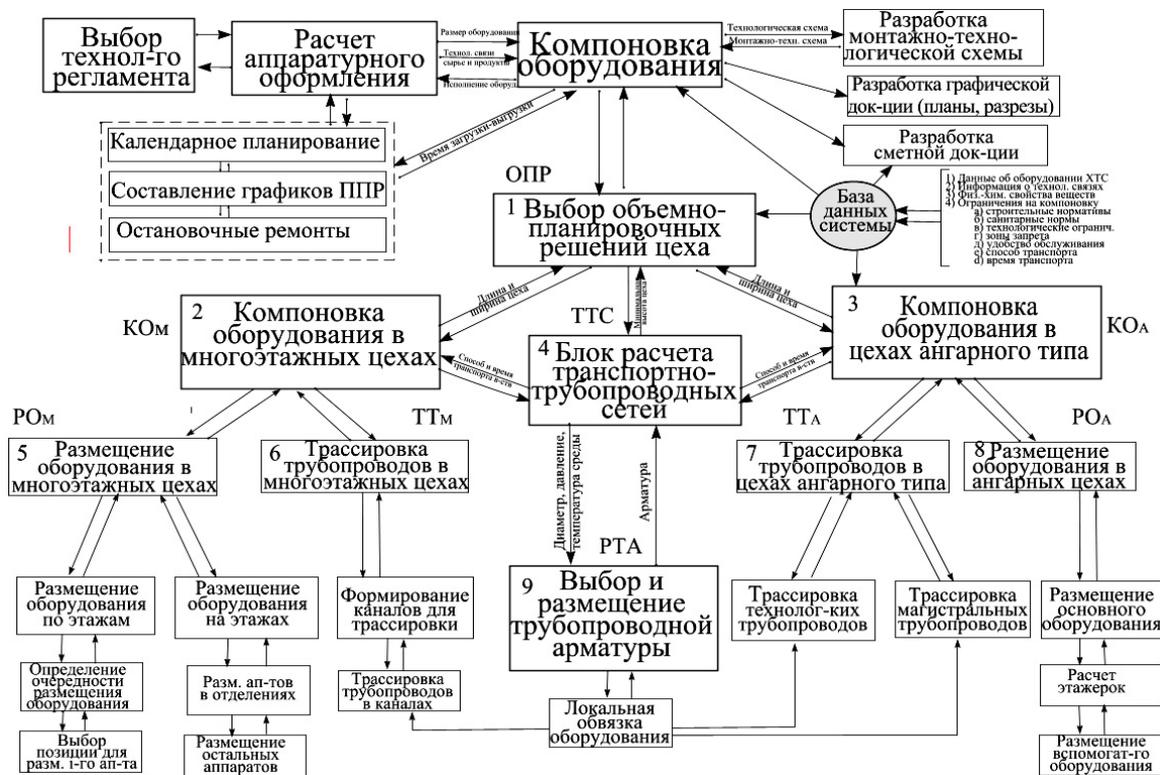


Рис. 2.1. Схема решения задачи компоновки

Рассмотрим более подробно предлагаемую структуру решения задачи компоновки.

В блоке 1 решается задача выбора объемно-планировочных решений цеха (задача ОПР). Для вновь проектируемого производства определяется тип строительной конструкции (многоэтажное здание из типовых строительных элементов или здание ангарного типа), габариты производственного здания, состав и размеры технологических отделений проектируемого производства. Для реконструируемых производств определяется пригодность существующей строительной конструкции для размещения в ней оборудования ХТС, определяется состав отделений, их размеры и положение в цехе. Цель задачи ОПР – выбрать из всех приемлимых вариантов строительных решений цеха наиболее подходящие для проектируемого производства.

В состав исходных данных для ее решения (координирующий сигнал  $K_{\text{ОПР}}$ ) входят: типы, номера и габариты размещаемых аппаратов, сведения об уже установленном оборудовании, связи каждого аппарата при выпуске разных продуктов (номера аппаратов, подающих сырье и полуфабрикаты, принимающих продукты их переработки), указания по видам транспорта веществ между аппаратами. Критерий оптимальности решения задачи ОПР – минимальные затраты на: строительные конструкции и их монтаж, стоимость земли под застройку, а также затраты на другие составляющие критерия 5 (металлоконструкции, трубопроводы и монтаж оборудования).

Основные ограничения:

- обеспечение возможности размещения оборудования ХТС и трасс технологических трубопроводов в выбранной строительной конструкции;
- обеспечение возможности обслуживания и ремонта оборудования ХТС;
- выполнение требований транспорта веществ по трубопроводам;
- выполнение правил по взрывопожарной опасности в производственных помещениях.

Информационный сигнал  $I_{\text{ОПР}}$  включает в себя: тип строительной конструкции (ангар или многоэтажное здание), определяющие размеры строительной конструкции (габариты, высоты этажей и шаг сетки колонн), состав технологических помещений и общую стоимость строительной конструкции.

В блоке 2 решается задача компоновки оборудования в многоэтажных производственных зданиях (задача КОМ). Целью задачи является определение пространственного расположения оборудования ХТС, трасс технологических трубопроводов и трубопроводной арматуры в производственном помещении. Координирующий сигнал  $K_{\text{КОМ}}$  содержит ту же информацию, что и сигнал  $K_{\text{ОПР}}$ , но тип строительной конструкции, ее габариты, а также состав производственных отделений уже известны.

Критерий оптимальности решения задачи КО<sub>М</sub> – минимальные затраты на: насосы, трубопроводы, трубопроводную арматуру, а также затраты на монтаж оборудования и транспорт веществ по трубопроводам.

Основные ограничения: выполнение правил размещения оборудования (2.12) – (2.17); трассировки трубопроводов (2.18) – (2.22); транспорта (2.23) – (2.31) и размещения трубопроводной арматуры.

Решение этой задачи предлагается выполнить путем итерационного решения задач меньшей размерности, имеющих самостоятельное значение в проектной практике. Это:

- задача размещения оборудования в многоэтажном производственном помещении (блок 5, задача РО<sub>М</sub>);
- задача трассировки трубопроводов в многоэтажном производственном помещении (блок 6, задача ТТ<sub>М</sub>);
- задача расчета транспортно-трубопроводных сетей (блок 4, задача ТТС);
- задача выбора и размещения трубопроводной арматуры (блок 9, задача РТА).

Информационный сигнал I\_КО<sub>М</sub> представляет собой объединение информационных сигналов задач нижестоящего уровня: сигналов задачи РО<sub>М</sub>, задачи ТТ<sub>М</sub>, задачи ТТС и задачи РТА. Рассмотрим их подробнее.

Задача РО<sub>М</sub> (размещения технологического оборудования в многоэтажном производственном помещении – блок 5) заключается в уточнении этажности и габаритов производственного здания, в нахождении координат размещаемых аппаратов, выборе способа транспорта продуктов и способа установки оборудования.

В состав исходных данных для ее решения (координирующий сигнал К\_РО<sub>М</sub>) входят: типы, номера и габариты размещаемых аппаратов, сведения об уже установленном оборудовании, связи каждого аппарата при выпуске разных продуктов (номера аппаратов, подающих сырье и полуфабрикаты, принимающих продукты их переработки), указания по способу транспорта веществ между отдельными аппаратами. Критерий оптимальности решения задачи РО<sub>М</sub> – минимальный производственный объем, занимаемый размещаемыми аппаратами, минимальные затраты на средства транспортировки веществ и минимальные затраты на монтаж оборудования.

Основные ограничения:

- учет наличия зон, запретных для размещения технологического оборудования (установленное оборудование, строительные конструкции, монтажные проемы, проезды и проходы, служебные помещения, лифты и лестницы);
- ограничения на взаимное расположение аппаратов с точки зрения допустимых видов транспорта веществ между ними (самотек);
- указания по размещению однотипных аппаратов (реакционные, фильтровальные, сушильные отделения);
- обеспечение норм обслуживания и ремонта оборудования.

Информационный сигнал I\_РО<sub>М</sub> включает: координаты размещенных аппаратов и их ориентацию в пространстве, координаты расположения штуцеров аппаратов, уточненные сведения о габаритах производственного помещения.

Эти данные вместе с координатами начала и окончания каждого трубопровода, возможными видами транспорта веществ и данными о размещаемой на каждом трубопроводе арматуре, требованиями к материалу трубопроводов формируют координирующий сигнал К\_ТТ<sub>М</sub> для задачи ТТ<sub>М</sub> (блок 6).

Критерий оптимальности решения задачи ТТ<sub>М</sub> – минимальные совокупные затраты на технологические трубопроводы, трубопроводную арматуру и транспорт веществ по трубопроводам. Основные ограничения:

- прокладка трасс трубопроводов в пределах разрешенных зон;
- выполнение правил совместной прокладки трубопроводов с повышенным давлением, вакуумом, агрессивными, взрыво-пожароопасными веществами;
- возможности объединения трасс (общие участки);
- обеспечение правил эксплуатации и ремонта трубопроводов.

Информационный сигнал I\_ТТ<sub>М</sub> содержит: результаты решения задачи ТТ<sub>М</sub> – пространственное расположение трасс всех технологических трубопроводов производства (координаты начал, окончаний и всех промежуточных точек изменения направления трубопроводов), диаметры и материалы трубопроводов, способ транспорта веществ по каждому из них (если не указан заранее), длительности транспортных операций по загрузке-выгрузке оборудования (последние определяются в блоке 4 – расчета ТТС).

В блоке 3 решается задача компоновки оборудования в цехах ангарного типа (задача КО<sub>А</sub>). Целью задачи является определение пространственного расположения оборудования ХТС, расчет металлоконструкций под оборудование, определение трасс технологических трубопроводов и расположения трубопроводной арматуры в производственном помещении ангарного типа. Координирующий сигнал К\_КО<sub>А</sub> задачи КО<sub>А</sub> аналогичен координирующему сигналу К\_КО<sub>М</sub> задачи КО<sub>М</sub>. Отличие состоит в типе и параметрах строительной конструкции, определенной в задаче ОПР.

Критерий оптимальности решения задачи КО<sub>А</sub> – минимальные затраты на: монтаж оборудования, металлоконструкции, насосы, трубопроводы, трубопроводную арматуру, а также затраты на транспорт веществ по трубопроводам.

Основные ограничения: выполнение правил размещения оборудования; трассировки трубопроводов; транспорта и размещения трубопроводной арматуры в цехах ангарного типа.

Схема решения задачи КО<sub>А</sub> аналогична по своей структуре схеме решения задачи КО<sub>М</sub>. Решаются те же подзадачи, что и в блоке 2:

- задача размещения оборудования в ангарном цехе (блок 7, задача РО<sub>А</sub>);
- задача трассировки трубопроводов в ангарном цехе (блок 6, задача ТТ<sub>А</sub>);
- задача расчета транспортно-трубопроводных сетей (блок 4, задача ТТС);
- задача выбора и размещения трубопроводной арматуры (блок 9, задача РТА);
- задача проектирования и расчета металлоконструкций под оборудование ХТС (блок 11, задача РМ).

Блок 4 расчета транспортно-трубопроводных сетей (задача ТТС) включает в себя комплекс расчетных модулей по определению параметров ТТС: расчет диаметров трубопроводов, времени транспорта продуктов, выбор способа транспорта веществ, расчет тепловой изоляции, подбор насосов, расчет простых и разветвленных трубопроводов. Координирующий

сигнал  $K_{TTC}$  блока TTC может содержать различную информацию (в зависимости от того, из какого блока пришел этот сигнал и в какую подзадачу из перечисленных выше надо решить).

Информационный сигнал  $I_{TTC}$  содержит всю необходимую информацию о параметрах TTC необходимую для решения задач вышестоящего уровня (задачи ОПР, задачи КО<sub>М</sub>, задачи КО<sub>А</sub>).

Анализ информационного сигнала  $I_{TTC}$  совместно с информационными сигналами других задач может привести к выводу о необходимости изменения ранее принятых решений в задачах вышестоящего уровня. Так, результаты гидравлического расчета определяют основные параметры трубопроводов, что может привести к изменению проекта трассировки трубопроводов (задачи ТТ<sub>М</sub> и ТТ<sub>А</sub>), что, в свою очередь, может потребовать изменения решений по размещению оборудования (задачи РО<sub>М</sub> и РО<sub>А</sub>) и, в конечном итоге, к пересмотру решений задачи ОПР.

### **3. ВЫБОР ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ЦЕХА**

#### **3.1. ВЫБОР ТИПА КОНСТРУКЦИИ ЦЕХА И ВЛИЯНИЕ ЕГО НА КОМПОНОВКУ ОБОРУДОВАНИЯ**

Для принятия компоновочных решений большую роль играет выбор конструкции помещений, так как это определяет дальнейший процесс моделирования. Размещение производств может осуществляться на открытых площадках, в многоэтажных зданиях и в зданиях ангарного типа [2, 13, 26].

С точки зрения автоматизации проектирования производств, выбор конструкции цеха (ангарный цех, многоэтажный, размещение производств на открытых площадках) существенно влияет на способы решения данной задачи.

Проектирование производств на открытых площадках применяют в особых случаях, так как повышается износ оборудования, что вызвано систематическим попаданием на технологическое оборудование осадков, перепадами температур. При проектировании колонного оборудования необходим расчет на ветровую нагрузку и принятие мер для предотвращения опрокидывания оборудования. Ремонт и обслуживание технологического оборудования и трубопроводов также усложняются. Но такой способ иногда необходим, например, в случаях, когда невозможно обеспечить требования по безопасности производств в закрытом помещении.

При компоновке оборудования в многоэтажных производственных зданиях к строительной конструкции предъявляются следующие требования [12, 45]:

- иметь в плане форму прямоугольника;
- монтироваться из унифицированных железобетонных конструкций с шагом сетки колонн  $6 \times 6$  или  $9 \times 9$  м;
- высота этажей должна быть кратной 0,6 м, но не менее 3 м;
- ширина многоэтажного здания должна быть не менее 18 м;
- количество этажей определяется характером производства, а также зависит от плана застройки и может меняться;
- для монтажа и демонтажа оборудования в строительной конструкции должны быть предусмотрены постоянные или временные монтажные проемы.

Одним из недостатков применения многоэтажных цехов является экономическая неэффективность при проектировании производств малой мощности. Часто проектным организациям приходится сталкиваться с проблемой размещения производств в существующих помещениях, изначально проектируемых под производства других отраслей промышленности.

При проектировании производств в ангарных цехах отсутствует дискретность при размещении технологического оборудования, что, с одной стороны, увеличивает число возможных вариантов компоновки, а, следовательно, дает возможность найти более оптимальное решение при проектировании, но с другой стороны – требует использования новых, более сложных методов и алгоритмов нахождения оптимального решения задачи. Появляются такие подзадачи, как определение конфигураций этажерок, лестниц. Так как в ангарных цехах только небольшая часть трубопроводов проходит в специальных каналах, то появляется необходимость решать совместно задачи размещения технологического оборудования и трассировки технологических трубопроводов. При этом необходим учет возможности прохождения трубопроводов по стенам, под площадками обслуживания, под оборудованием и в ряде других мест, нахождение трасс в которых позволяет осуществить технологический процесс, выдержать все требования нормативной документации, а также обеспечить возможность обслуживания, монтажа и ремонта оборудования и трубопроводов.

С точки зрения пожарной безопасности [44], в зависимости от перерабатываемых веществ [6, 8, 40] производственные помещения подразделяются на пять категорий: А, Б, В, Г, Д.

В зависимости от категории строительной конструкции цехов также имеют те или иные особенности. Например, на случай аварии для уменьшения разрушений, в помещениях А и Б перекрытия этажей должны иметь взрывные проемы. Помещения этих категорий лучше размещать у наружных стен.

#### **3.2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ЦЕХА**

Словесно задачу выбора объемно-планировочных решений (ОПР) цеха можно сформулировать следующим образом:

*Определить значения объемно-планировочных параметров типового (многоэтажного) производственного здания и его размеры, при которых затраты на строительную конструкцию и компоновку в ней (с соблюдением всех норм и правил) оборудования ХТС будут минимальны.*

Для формализации задачи введем ряд допущений и обозначений:

1. Строительная конструкция монтируется из унифицированных строительных элементов и имеет в плане форму прямоугольника.
2. Величина шага сетки колонн для многоэтажного цеха равна 6.
3. Максимальное число этажей в многоэтажной строительной конструкции 5.
4. Допускается наличие секций разной этажности.
5. Максимальная высота одноэтажного цеха не превышает 18 м.

Информационные и управляющие сигналы задачи представлены на рис. 3.1.

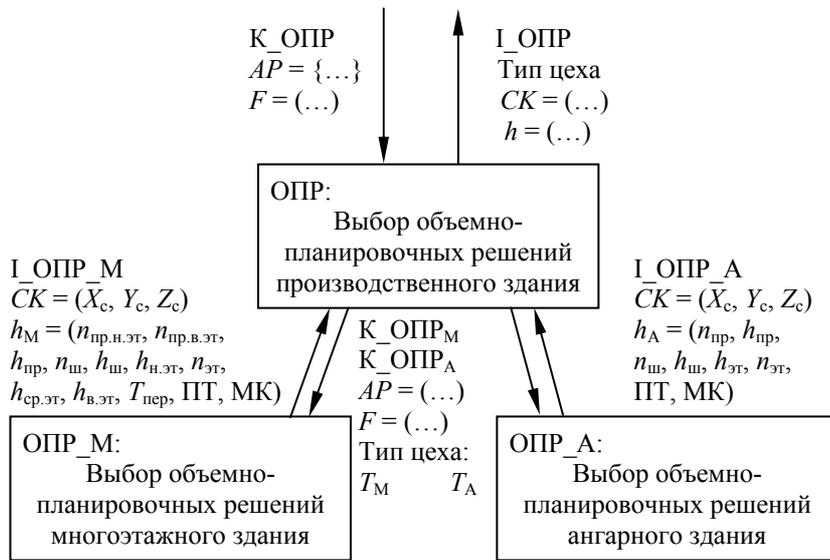
**Исходные данные для задачи выбора ОПП** (координирующий сигнал  $K\_ОПП$ ) включают:

– **информацию о оборудовании ХТС**

$$AP = \{AP_i = (\bar{x}ap_i, \bar{y}ap_i, \bar{z}ap_i, lap_i^x, lap_i^y, lap_i^z, \bar{m}ap_i), i = 1...NA\},$$

где  $AP_i$  – совокупность параметров, описывающих информацию об аппарате с номером  $i$ ;  $NA$  – общее число оборудования ХТС в цехе;  $\bar{x}ap_i, \bar{y}ap_i, \bar{z}ap_i$  – координаты расположения оборудования в цехе (в данной задаче неизвестны);  $lap_i^x, lap_i^y, lap_i^z$  – размеры параллелепипеда, описывающего  $i$ -й аппарат по осям  $X, Y, Z$ ;  $\bar{m}ap_i$  – вес аппарата;

– **информацию о структуре технологических связей** и данные о физико-химических свойствах веществ, транспортируемых по трубопроводам:



**Рис. 3.1. Информационные и управляющие сигналы задачи выбора ОПП**

$$F = f_{10 \times L} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1l} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{101} & f_{102} & \dots & f_{10l} \end{pmatrix} \text{ – матрица связей,}$$

где  $f_{1l}$  – номер аппарата источника связи  $l$ ;  $f_{2l}$  – номер аппарата приемника связи  $l$ ;  $f_{3l}$  – стоимость связи  $l$ ;  $f_{4l}$  – способ транспорта по связи  $l$ ;  $l = 1$  – самотек при периодической работе аппаратов;  $l = 2$  – самотек при непрерывной работе аппаратов;  $l = 3$  – транспортировка с помощью насоса;  $l = 4$  – перекачивание;  $l = 5$  – транспорт сыпучих материалов;  $f_{5l}...f_{10l}$  – физико-химические свойства веществ, транспортируемых по трубопроводам, и параметры трубопроводов ( $p, t, \gamma, \rho, \mu, d, \Delta$  – давление, температура, удельный вес, плотность, динамическая вязкость, диаметр, шероховатость);  $L$  – общее число связей между аппаратами.

**Выходные данные задачи выбора ОПП** (информационный сигнал  $I\_ОПП$ ) содержат сведения о следующих параметрах:

- **тип цеха** (многоэтажный или ангарный);
- **информацию о размерах цеха:**  $CK = (X_c, Y_c, Z_c)$  – габаритные размеры цеха (длина, ширина, высота);
- **информацию о объемно-планировочных параметрах цеха:**

а) для многоэтажного цеха

$$h_M = (n_{пр.н.эт}, n_{пр.в.эт}, h_{пр}, n_{ш}, h_{ш}, h_{н.эт}, n_{эт}, h_{ср.эт}, h_{в.эт}, T_{пер}, ПТ, МК),$$

где  $n_{пр}$  – число пролетов;  $h_{пр}$  – ширина одного пролета;  $n_{ш}$  – число шагов;  $h_{ш}$  – ширина одного шага;  $n_{эт}$  – число этажей;  $h_{н.эт}$  – высота нижнего этажа;  $h_{ср.эт}$  – высота средних этажей;  $h_{в.эт}$  – высота верхнего этажа;  $T_{пер}$  – тип перекрытия; ПТ – наличие в цехе подвешенного транспорта; МК – наличие в цехе мостового крана;

$$\text{ПТ} = \begin{cases} 1 - \text{подвесной транспорт используется;} \\ 2 - \text{подвесной транспорт не используется;} \end{cases}$$

$$\text{МК} = \begin{cases} 1 - \text{мостовой кран используется;} \\ 2 - \text{мостовой кран не используется;} \end{cases}$$

б) для ангарного цеха

$$h_A = (n_{\text{пр}}, h_{\text{пр}}, n_{\text{ш}}, h_{\text{ш}}, n_{\text{ур}}, \text{ПТ}, \text{МК}),$$

где  $n_{\text{пр}}$  – число пролетов;  $h_{\text{пр}}$  – ширина одного пролета;  $n_{\text{ш}}$  – число шагов;  $h_{\text{ш}}$  – ширина одного шага;  $n_{\text{ур}}$  – число уровней металлоконструкции; ПТ – наличие в цехе подвешенного транспорта; МК – наличие в цехе мостового крана.

### 3.3. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ВЫБОРА ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ЦЕХА

Основные соотношения модели включают следующие ограничения.

#### I. Ограничения на размеры цеха.

– На предельно допустимые размеры цеха:

$$X_{\min} \leq X_c \leq X_{\max}; \quad Y_{\min} \leq Y_c \leq Y_{\max}; \quad Z_{\min} \leq Z_c \leq Z_{\max}. \quad (3.1)$$

– На минимальную высоту цеха:

$$Z_{\min} \geq \max la_p^z, \quad p = 1, \dots, NA. \quad (3.2)$$

– На высоту цеха с учетом транспорта веществ:

пусть  $A^j = \{A_i^j | i = 1, 2, \dots, l_j\}$  – подмножество аппаратов, объединенных следующими правилами:

а)  $\forall A_i^j, A_{i+1}^j \in A^j \exists 0 \leq p \leq L, f_{1p} = A_i^j, f_{2p} = A_{i+1}^j \wedge f_{4p} = 1;$

б)  $\forall l (l = \overline{1, L}) f_{4l} = 1, f_{1l} \neq A_l^j, f_{2l} \neq A_l^j$ , тогда  $Z_{\min} \geq \sum_{i \in A^j} la_i^z. \quad (3.3)$

– Зависимость размеров цеха от основных объемно-планировочных параметров цеха:

$$X_c = n_{\text{ш}} h_{\text{ш}}; \quad Y_c = n_{\text{пр}} h_{\text{пр}}; \quad Z_c = h_{\text{н.эт}} + \sum_2^{n_{\text{ур}}-1} h_{\text{ср.эт}} + h_{\text{в.эт}}; \quad (3.4)$$

– На площадь цеха:

$$\sum_{p=1}^{NA} (la_p^x + 2\delta_p^x)(la_p^y + 2\delta_p^y) + 2\Delta x Y_c + 2\Delta y X_c + k\beta_x \beta_y \leq X_c Y_c n_{\text{эт}}. \quad (3.5)$$

– На объем цеха:

$$X_c Y_c Z_c \geq k' \sum_{p=1}^{NA} V_p + \sum_{m=1}^M V_m. \quad (3.6)$$

#### II. Ограничения на определяемые объемно-планировочные параметры строительной конструкции цеха.

– На количество этажей в цехе:

$$\begin{cases} 2 < n_{\text{эт}} \leq 4, \text{ если } (n_{\text{пр}} = 2) \wedge (n_{\text{ш}} = 6) \wedge (h_{\text{пр}} = 6); \\ 2 < n_{\text{эт}} \leq 5, \text{ если } n_{\text{пр}} > 2. \end{cases} \quad (3.7)$$

– На число пролетов в цехе:

$$(n_{\text{пр}} = 2 \wedge h_{\text{пр}} = 9) \vee (n_{\text{пр}} = 3 \wedge h_{\text{пр}} = 6) \text{ при МК} = 1. \quad (3.8)$$

– На использование в цехе подвешенного транспорта и мостового крана:

$$(h_{\text{в.эт}} = 10,8) \wedge (h_{\text{пр.в.эт}} = 18) \text{ при МК} = 1;$$

$$(h_{\text{в.эт}} = 7,2) \wedge (h_{\text{пр.в.эт}} = 18) \text{ при ПТ} = 1. \quad (3.9)$$

– На высоты этажей:

$$h_{\text{н.эт}} \in (3,6; 4,8; 6; 7,2); \quad h_{\text{ср.эт}} \in (3,6; 4,8; 6); \quad h_{\text{в.эт}} \in (3,6; 4,8; 6; 7,2; 10,8).$$

(3.10)

– На тип перекрытия:

$$\begin{cases} T_{\text{пер}} = 1, \text{ если } (n_{\text{ш}} = 6) \wedge (h_{\text{пр}} = 9) \wedge (h_{\text{эт}} = 3,6); \\ T_{\text{пер}} = 2, \text{ если } \text{МК} = 1; \\ T_{\text{пер}} \in (1, 2) \text{ при } (h_{\text{ш}} = 6) \wedge (h_{\text{пр}} = 6) \wedge \text{МК} = 0. \end{cases} \quad (3.11)$$

В качестве целевой функции  $I(T, CK, h)$  задачи выбора ОПР приняты капитальные затраты на проектируемый объект. Составляющими критерия являются стоимости: металлоконструкции для монтажа оборудования внутри цеха ( $I_{\text{мет}}$ ), земли под цех ( $I_3$ ), строительной конструкции ( $I_c$ ), монтажа оборудования внутри цеха ( $I_{\text{мон}}$ ), технологических трубопроводов ( $I_{\text{тр}}$ ), насосов для транспорта веществ по трубопроводам ( $I_{\text{нас}}$ ).

$$I(T, CK, h) = I_{\text{мет}} + I_3 + I_c + I_{\text{мон}} + I_{\text{тр}} + I_{\text{нас}}. \quad (3.12)$$

С учетом изложенного выше, задача выбора ОПР цеха формулируется так: определить тип цеха, габариты цеха  $S = (X_{\text{ц}}, Y_{\text{ц}}, Z_{\text{ц}})$ , а также его объемно-планировочные параметры:

$$h_M = (n_{\text{пр.н.эт}}, n_{\text{пр.в.эт}}, h_{\text{пр}}, n_{\text{ш}}, h_{\text{ш}}, h_{\text{н.эт}}, n_{\text{эт}}, h_{\text{ср.эт}}, h_{\text{в.эт}}, T_{\text{пер}}, \text{ПТ}, \text{МК})$$

или

$$h_A = (n_{\text{пр}}, h_{\text{пр}}, n_{\text{ш}}, h_{\text{ш}}, n_{\text{ур}}, \text{ПТ}, \text{МК}),$$

при которых критерий (3.12) достигает минимума, при выполнении ограничений математической модели (3.1) – (3.11).

При решении задачи выбора ОПР цеха размещение оборудования (координаты  $xap_i, yap_i, zap_i$  аппаратов) еще не известно, поэтому при расчете длины соединений  $\rho(f_{1i}, f_{2i})$  между аппаратами ХТС используются нижние оценки длины соединений между размещаемыми объектами, которые зависят от размеров строительной конструкции, сложности соединений оборудования ХТС. Методика расчета нижней оценки длины соединений [14] основана на использовании аппарата теории графов и заключается в следующем.

Все размещаемые объекты и связи между ними представлены в виде графа  $G = (X, U)$ . Сначала подсчитывается число вершин и ребер графа  $G$ . Далее в координатной сетке  $G_r$  строится стандартный граф  $G_{\Delta} = (X_{\Delta}, U_{\Delta})$ , имеющий такое же число вершин и ребер, как и граф  $G$ . Построение ведется путем последовательного помещения в сетку сначала всех ребер  $G_{\Delta}$ , длина которых равна 1. Если число ребер графа  $G_{\Delta}$  с длиной 1 равно или больше числа ребер графа  $G$ , то процесс построения заканчивается. В противном случае последовательно добавляются ребра с длинами 2, 3 и далее до тех пор, пока общее число ребер графа  $G_{\Delta}$  не станет равным числу ребер графа  $G$ . Затем производится ранжирование ребер графа  $G$  по весам таким образом, что  $\varphi(U_i) \geq \varphi(U_i + 1) \forall i = \overline{1, l}$ , где  $\varphi(U_i)$  – вес  $U_i$ -го ребра, длина которого равна 1, и эти веса приписываются ребрам графа  $G_{\Delta}$  в соответствии с порядком построения его ребер. Подсчитав суммарную стоимость ребер графа  $G_{\Delta}$ , получим нижнюю оценку минимальной суммарной длины для графа  $G$ .

$$I(G_{\Delta}) = \sum_{j=1}^{m1} \varphi(U_j) + 2 \sum_{j=1}^{m2} \varphi(U_{m1+j}) + k \sum_{j=1}^{mk} \varphi(U_{m1+m2+\dots+mk-1+j}). \quad (3.13)$$

Процедурная модель выбора ОПР производства основана на генерации допустимых (в соответствии с ограничениями модели (3.1) – (3.11)) вариантов цеха и выбора из них лучшего по критерию (3.12). Информационной основой для генерации вариантов цеха является база данных типовых ОПР производства.

## 4. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В МНОГОЭТАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

### 4.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ В МНОГОЭТАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

В проектной практике можно выделить следующие наиболее часто решаемые задачи, связанные с размещением оборудования ТС в многоэтажных строительных конструкциях.

1. Задача совместного проектирования объемно-планировочных решений (ОПР) строительной части, размещения оборудования и трассировки ТП.
2. Задача пространственного размещения оборудования ТС в заданном объеме цеха.
3. Задача размещения оборудования на этаже цеха.
4. Задача размещения нового оборудования относительно уже размещенного.
5. Задача трассировки технологических коммуникаций.

Задачи 2 – 4 возникают при реконструкции химических производств. Задача 5 – трассировки технологических коммуникаций – неразрывно связана с задачами 2 – 4. Задача 1 является наиболее общим случаем и возникает при проектировании новых производств.

При формировании критерия оптимальности задач компоновки целесообразнее всего включать в него те составляющие затрат на проектируемый объект, которые непосредственно зависят от расположения оборудования ТС. Для задачи 1 такими

составляющими являются: стоимость технологических линий связи между аппаратами  $I_1$ ; стоимости средств транспортировки веществ по связям  $I_2$ ; стоимость строительной конструкции, занятой под оборудование  $I_3$ :

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (4.1)$$

Для задачи 2 критерий будет иметь вид:

$$I = I_1 + I_2. \quad (4.2)$$

Для задачи 3:

$$I = I_1. \quad (4.3)$$

Содержательная (словесная) постановка задачи 1 может быть сформулирована следующим образом: определить с учетом всех правил, требований и ограничений такое пространственное расположение оборудования ХТС с заданной структурой технологических связей и такие габариты производственного помещения, при которых затраты на проектируемый объем были бы минимальными.

Информационные потоки задачи компоновки в многоэтажных производственных помещениях представлены на рис. 4.1.

**Исходные данные для задачи компоновки** (координирующий сигнал  $K\_КО_M$ ) включают:

– **информацию о размерах и весе оборудования ХТС:**

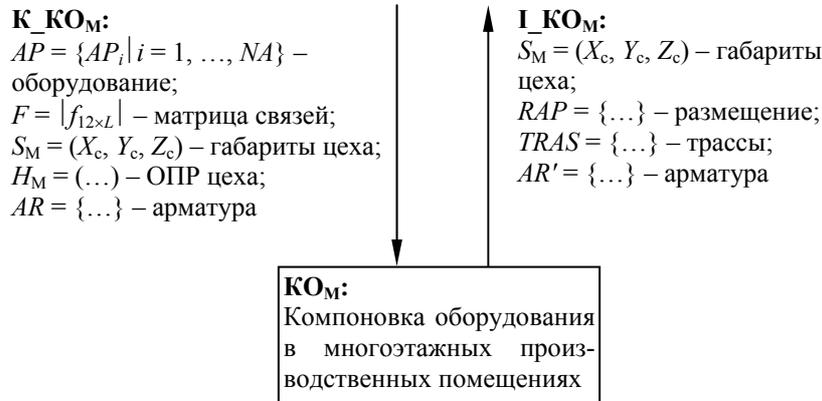
$$AP = \{AP_i = (lap_i^x, lap_i^y, lap_i^z, map_i), i = 1, \dots, NA\},$$

где  $NA$  – общее число оборудования ХТС в цехе;  $lap_i^x, lap_i^y, lap_i^z$  – размеры параллелепипеда, описывающего  $i$ -й аппарат по осям  $X, Y, Z$ ;  $map_i$  – вес аппарата;

– **информацию о структуре технологических связей** и данные о физико-химических свойствах веществ, транспортируемых по трубопроводам:

$$F = f_{10 \times L} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1l} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{101} & f_{102} & \dots & f_{10l} \end{pmatrix} \text{ – матрица связей,}$$

где  $f_{1l}$  – номер аппарата источника связи  $l$ ;  $f_{2l}$  – номер аппарата приемника связи  $l$ ;  $f_{3l}$  – стоимость связи  $l$ ;  $f_{4l}$  – способ транспорта по связи  $l$



**Рис. 4.1. Информационные и управляющие сигналы задачи компоновки в многоэтажных производственных помещениях**

(1 – самотек при периодической работе аппаратов; 2 – самотек при непрерывной работе аппаратов; 3 – транспортировка с помощью насоса; 4 – перекачивание; 5 – гравитационный (самотечный) способ транспорта сыпучих материалов);  $f_{3l} \dots f_{10l}$  – физико-химические свойства веществ транспортируемых по трубопроводам, и параметры трубопроводов ( $p, t, \gamma, \rho, \mu, d, \Delta$  – давление, температура, удельный вес, плотность, динамическая вязкость, диаметр, шероховатость);  $L$  – общее число связей между аппаратами;

– **информацию о габаритных размерах цеха** (полученную при решении задачи выбора ОПП цеха):

$$S_M = (X_c, Y_c, Z_c),$$

где  $X_c$  – длина цеха;  $Y_c$  – ширина цеха;  $Z_c$  – высота цеха;

– **информацию о объемно-планировочных параметрах многоэтажного здания:**

$$H_M = (n_{пр.н.эт}, n_{пр.в.эт}, h_{пр}, n_{ш}, h_{ш}, h_{н.эт}, n_{эт}, h_{ср.эт}, h_{в.эт}, T_{пер}, ПТ, МК),$$

где  $n_{пр}$  – число пролетов;  $h_{пр}$  – ширина одного пролета;  $n_{ш}$  – число шагов;  $h_{ш}$  – ширина одного шага;  $n_{эт}$  – число этажей;  $h_{н.эт}$  – высота нижнего этажа;  $h_{ср.эт}$  – высота средних этажей;  $h_{в.эт}$  – высота верхнего этажа;  $T_{пер}$  – тип перекрытия; ПТ – признак, показывающий наличие в цехе подвешенного транспорта; МК – признак, показывающий наличие в цехе мостового крана;

– **информацию о типах и размерах трубопроводной арматуры:**

$$AR = \left\{ AR_{kj} = \left( tar_{kj}, lar_{kj}^x, lar_{kj}^y, lar_{kj}^z, \theta_{kj}, d_{kj}, h_{kj}^{стр} \right), \right. \\ \left. k = 1, \dots, NAR_j, j = 1, \dots, NT \right\},$$

где  $AR_{kj}$  – вектор параметров  $k$ -й арматуры, расположенной на трубопроводе с номером  $j$ .

**Выходные данные задачи компоновки КОМ** (информационный сигнал  $I\_КОМ$ ) содержат сведения о следующих параметрах:

– **уточненные габаритные размеры цеха:**

$$S_M = (X_c, Y_c, Z_c);$$

– **информацию о размещении оборудования ХТС:**

$$RAP_i = (xap_i, yap_i, zap_i, Qap), \quad i = 1, \dots, NA,$$

где  $xap_i, yap_i, zap_i$  – координаты расположения базовой точки  $i$ -го аппарата по осям  $X, Y, Z$ ;  $Qap_i$  – угол поворота аппарата относительно базового;  $NA$  – общее число оборудования ХТС в цехе;

– **информацию о расположении трасс технологических трубопроводов:**

$$TRAS_j = (X_{J0}, Y_{J0}, Z_{J0}, X_{J1}, Y_{J1}, Z_{J1}, \dots, X_{JK_j}, Y_{JK_j}, Z_{JK_j}) - \\ \text{пространственное расположение } j\text{-го трубопровода, } j = 1, 2, \dots, L,$$

где  $L$  – число технологических связей между аппаратами;  $X_{J0}, Y_{J0}, Z_{J0}$  – координаты начала трассы;  $X_{JK_j}, Y_{JK_j}, Z_{JK_j}$  – координаты конца трассы;  $X_{JM}, Y_{JM}, Z_{JM}, M = \overline{1, K_j - 1}$  – координаты точек изломов трассы;  $K_j$  – число прямоугольных фрагментов в трассе  $j$ ;

– **информацию о расположении трубопроводной арматуры на технологических трубопроводах:**

$$AR' = \left\{ AR'_{kj} = \left( xar_{kj}, yar_{kj}, zar_{kj}, \theta_{kj} \right), \quad k = 1, \dots, NAR_j, \quad j = 1, \dots, NT \right\},$$

где  $AR'_{kj}$  – вектор параметров  $k$ -й арматуры, принадлежащей трубопроводу с номером  $j$ ;  $NAR_j$  – общее число арматур  $j$ -го трубопровода;  $NT$  – общее число технологических связей ХТС;  $xar_{kj}, yar_{kj}, zar_{kj}$  – соответственно координаты расположения точки вставки трубопроводной арматуры по координатным осям;  $\theta_{kj}$  – выбранная ориентация арматуры в пространстве.

Для уменьшения размерности задачи исходная задача компоновки разбита на две последовательно решаемые подзадачи меньшей размерности, имеющие самостоятельное значение в процессе проектирования.

– **Задача проектирования размещения оборудования с одновременным определением габаритов цеха:**

$$\text{найти} \quad h^{1*} = \arg \min \{ S^1(h^1) \in H^1 = m^1(D_{AP} \times D_s) \}.$$

– **Задача трассировки технологических трубопроводов:**

$$\text{найти} \quad h^{2*} = \arg \min \{ S^2(h^2) \in H^2 = m^2(D_T \times D_{AR}) \},$$

где  $m^1; m^2; S^1; S^2; \Omega^1; \Omega^2; H^1; H^2$  – соответственно модели, критерии, алгоритмы и множества допустимых вариантов проектных решений задач размещения и трассировки.

#### 4.1.1. Аналитическая модель проектного решения задачи РАЗМЕЩЕНИЯ

Аналитическая модель проекта размещения ( $m^1$ ) разработана на основе уравнений (2.5) – (2.38) с учетом особенностей компоновки оборудования в многоэтажных цехах (фиксированный шаг сетки колонн, допустимая нагрузка на межэтажные перекрытия, возможность выбора зданий разной этажности и др.). Так, например, условие (2.6) имеет вид:

$$x_c / n_x = y_c / n_y = z_c / n_z = \Omega, \quad \Omega = \{6, 9\}; \quad (4.4)$$

условие размещения оборудования внутри цеха:

$$\begin{cases} a_i / 2 + \Delta x \leq x_i \leq x_c - a_i / 2 - \Delta x; \\ b_i / 2 + \Delta y \leq y_i \leq y_c - b_i / 2 - \Delta y; \\ 0 \leq z_i \leq z_c - c_i - \Delta z, \quad \forall i \in A^3; \end{cases} \quad (4.5)$$

условие выполнения требования транспорта веществ самотеком:

$$z_{f_{1l}} - H_{f_{1l}} \geq z_{f_{2l}} + C_{f_{2l}} - H_{f_{2l}}, \quad \forall l: f_{4l} = 1; \quad (4.6)$$

непересечения аппаратов друг с другом:

$$\left[ (z_i = z_j) \wedge \left\{ \left( \left( x_i + \lambda_x \frac{a_i}{2} + \delta_x^i \right) - \left( x_j - \lambda_x \frac{a_j}{2} - \delta_x^j \right) \right) \lambda_x < 0 \vee \right. \right.$$

$$\vee \left( \left( y_i + \lambda_y \frac{b_i}{2} + \delta_y^i \right) - \left( y_i - \lambda_y \frac{b_i}{2} - \delta_y^i \right) \lambda_y < 0 \right) \vee [z_i \neq z_j], \quad (4.7)$$

где  $i, j \in A^6$ ;  $\lambda_x = \text{sign}(x_j - x_i)$ ;  $\lambda_y = \text{sign}(y_j - y_i)$ ;

непересечения аппаратов со строительными колоннами:

$$\left\{ \left( x_i - a_i / 2 \geq \left[ \frac{x_i}{h_x} \right] h_x + \frac{\beta_x}{2} \right) \wedge \left( x_i + a_i / 2 \leq \left[ \frac{x_i + h_x}{h_x} \right] h_x - \frac{\beta_x}{2} \right) \right\} \vee \\ \vee \left\{ \left( y_i - b_i / 2 \geq \left[ \frac{y_i}{h_y} \right] h_y + \frac{\beta_y}{2} \right) \wedge \left( y_i + b_i / 2 \leq \left[ \frac{y_i + h_y}{h_y} \right] h_y - \frac{\beta_y}{2} \right) \right\}, \forall i \in A^7; \quad (4.8)$$

размещения оборудования в отдельном блоке:

$$\max_j \left( x_j + \frac{a_j}{2} \right) \leq x_i \vee x_i \leq \min_j \left( x_j - \frac{a_j}{2} \right) \vee \max_j \left( y_j + \frac{b_j}{2} \right) \leq y_j \vee \\ \vee y_i \leq \min_j \left( y_j - \frac{b_j}{2} \right) \vee \max_j \left( z_j + \frac{c_j}{2} \right) \leq z_i \vee z_i \leq \min_j (z_j), \quad (4.9)$$

$$\forall j \in A^{12}, \quad i \in A \setminus A^{12};$$

обеспечения зон для движения транспортных устройств:

$$z_i = z_j, \quad \left[ \frac{|x_i - x_j|}{h_x} \right] = 0, \quad \left[ \frac{y_i}{h_y} \right] - \left[ \frac{y_j}{h_y} \right] \geq 2, \quad \forall i, j \in A^{13}; \quad (4.10)$$

размещения оборудования в зонах с естественным освещением:

$$(y_i \geq y_j, \vee j \in A \setminus A^{14}) \vee (y_i \leq y_j, \vee j \in A \setminus A^{14}), \vee i \in A^{14}; \quad (4.11)$$

наличия зон свободных от оборудования:

$$\left\{ (z_i = z_m) \wedge \left( |x_i - \tilde{x}_m| \geq \frac{a_i + a_m}{2} \vee |y_i - \tilde{y}_m| \geq \frac{b_i + \tilde{b}_m}{2} \right) \right\} \vee \{z_i \neq z_m\} \quad (4.12)$$

и ряд других ограничений (способ установки оборудования (на межэтажное перекрытие или с провисанием, наличие монтажных проемов и грузовых лифтов и т.д.).

Разработан критерий приведенных затрат для выбора оптимального варианта размещения технологического оборудования с определением размеров многоэтажного цеха:

$$S^1 = (SK_1^1 + SK_3^1 + SK_4^1 + SK_5^1)E_H + SE_3^1. \quad (4.13)$$

С учетом вышесказанного постановка задачи размещения технологического оборудования в многоэтажных цехах формулируется как: найти такой вариант размещения технологического оборудования в многоэтажном цехе  $A = A_i(x_i, y_i, z_i, \alpha_i)$ ,  $\forall i = 1, 2, \dots, I$  и габариты цеха  $S_M = (X_c, Y_c, Z_c)$ , при которых критерий (4.13) достигает минимума и выполняются условия математической модели (4.4) – (4.12).

#### 4.1.2. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАЗМЕЩЕНИЯ

Рассматриваемая задача относится к классу экстремальных комбинаторных задач дискретного программирования и определена на множестве возможных перестановок размещаемого оборудования. В связи с большой размерностью таких задач в настоящее время не существует универсальных методов их решения. Все известные методы решения задач дискретного программирования можно разделить на точные и приближенные. К настоящему времени предложено несколько общих схем изложения точных методов дискретного программирования – это, в первую очередь, схема метода ветвей и границ, а также схема метода последовательного анализа вариантов, разработанная В.С. Михалевичем. Так, широко известный метод динамического программирования Беллмана, является частным случаем схемы Михалевича.

Другим направлением решения задач дискретного программирования является разработка и использование приближенных методов. Среди таких методов можно отметить «метод вектора спада», стохастической аппроксимации Ю.М. Ермольева, метод случайного поиска Л.А. Растргина и др.

Всю совокупность алгоритмов, используемых для решения практических задач размещения промышленных объектов, можно разделить на следующие основные группы:

1. Алгоритмы, основанные на использовании точных методов.
2. Конструктивные алгоритмы начального размещения.
3. Итерационные алгоритмы улучшения начального варианта размещения.

4. Алгоритмы, основанные на использовании методов случайного поиска.
5. Непрерывно-дискретные методы.
6. Алгоритмы нерегулярного размещения геометрических объектов.

К первой группе относится метод ветвей и границ для задачи квадратичного назначения.

Вторая и третья группы включают приближенные алгоритмы, в основном предназначенные для оптимизации размещения элементов в фиксированном наборе позиций. Характерной особенностью конструктивных алгоритмов является то, что они создают размещение. Тогда как итерационные алгоритмы предполагают задание начального варианта размещения.

Конструктивные алгоритмы используют последовательный и параллельно-последовательный процесс установки элементов в позиции при локальной оптимизации критерия качества размещения.

В итерационных алгоритмах производится переразмещение элементов или их групп с целью минимизации выбранного критерия.

Алгоритмы четвертой группы основаны на генерации вариантов размещения случайным образом. Принимая во внимание большое число ограничений в задаче размещения, трудно рассчитывать создать на основе метода случайного поиска эффективный алгоритм решения задачи, так как только для получения варианта размещения, удовлетворяющего системе ограничений задачи, может потребоваться просмотр очень большого числа вариантов.

Основной областью применения непрерывно-дискретных методов размещения являются конструкции, в которых позиции для установки заранее не фиксированы. Алгоритмы данной группы базируются на представлении размещаемых объектов в виде материальных точек, движущихся под действием сил.

Методы последней группы разработаны для случая размещения плоских геометрических объектов, когда множество позиций, пригодных для установки объектов, бесконечно. Сюда относится, в первую очередь, метод последовательно-одиночного размещения, а также метод, известный под названием метода адаптивного перебора или, в более поздней версии, метода сужающихся окрестностей.

#### 4.1.3. ПРОЦЕДУРНАЯ МОДЕЛЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ

Процедура решения задачи размещения, реализованная в системе компоновки [22], основана на комбинированном использовании алгоритма метода последовательного размещения МПР (конструирование начального варианта) и метода вектора спада МВС (улучшение варианта). Решение задачи осуществляется в два этапа: синтез варианта размещения ( $A^0$ ) с использованием МПР и его улучшение с помощью одного из алгоритмов МВС. При этом оказалось целесообразным декомпозировать задачу размещения на две: размещение по этажам и размещение на этажах.

МПР включает следующие последовательно выполняемые шаги:

- определение очередности размещения аппаратов;
- определение мест возможного размещения выбранного аппарата;
- определение оптимального по выбранному критерию места размещения.

Очередь размещения аппаратов формируется на основе критерия «важности», который вычисляется для каждого аппарата и зависит от его габарита, веса, стоимости технологических связей аппарата и наличия ограничений на размещение аппарата.

Выбор позиции для размещения очередного аппарата осуществляется в усеченной области, что позволяет повысить быстроедействие алгоритма.

Критерий назначения аппарата в позицию учитывает связи этого аппарата как с уже размещенными, так и с аппаратами, которые еще не установлены (делается прогноз).

МВС опишем следующей последовательностью шагов:

1. Строится окрестность  $L_K(A^0)$  заданного радиуса  $K$  с центром в  $A^0$ .
2. Решается локальная задача

$$I(A^*) = \min \{I(A^i) \mid A^i \in L_K(A^0) \cap H^1\}.$$

3. Если  $I(A^*) = I(A^0)$ , то поиск решения заканчивается. В противном случае делается замена  $A^0$  на  $A^*$  и вновь выполняются п. 1 и 2.

## 4.2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАССИРОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Найти 
$$T^* = \arg \min \{S^2(T) \mid T \in H^2 = m^2(D^2)\}, \quad (4.14)$$

где  $D^2$  – множество вариантов трассировки технологических коммуникаций;  $H^2$  – множество допустимых вариантов проектных решений;  $S^2$  – критерий;  $m^2$  – модель проектного решения задачи трассировки;

$T = \{T_j \mid T_j = \{(X_{jn}, Y_{jn}, Z_{jn}), n = \overline{0, K_j}\}, j = \overline{1, L}\}$  – вариант трассировки.

### 4.2.1. Аналитическая модель проектного решения задачи трассировки

Аналитическая модель проектного решения трассировки учитывает следующие условия:

- Прокладка трубопроводов в ортогональной метрике:

$$\begin{cases} (x_{j^{n+1}} - x_{j^n})(y_{j^{n+1}} - y_{j^n}) = 0; \\ (x_{j^{n+1}} - x_{j^n})(z_{j^{n+1}} - z_{j^n}) = 0; \\ (y_{j^{n+1}} - y_{j^n})(z_{j^{n+1}} - z_{j^n}) = 0, \quad \forall n \in \{0, 1, \dots, k_{j-1}\}, \quad j \in M^{17}. \end{cases} \quad (4.15)$$

– Прокладка трасс трубопроводов по уровням:

$$z_{j^n} \in [U_{\rho^*}^x, U_{\rho^*}^{x*}] \cup [U_{\rho^*}^y, U_{\rho^*}^{y*}] \forall (x_{j^n}, y_{j^n}, z_{j^n}), \quad n=1, 2, \dots, K_j-1. \quad (4.16)$$

– Ориентация трасс в каналах:

если  $z_{j^n}, z_{j^{n+1}} \in [U_{\rho^*}^x, U_{\rho^*}^{x*}]$ , то  $x_{j^n} \neq x_{j^{n+1}}, y_{j^n} = y_{j^{n+1}}$ ;

если  $z_{j^n}, z_{j^{n+1}} \in [U_{\rho^*}^y, U_{\rho^*}^{y*}]$ , то  $y_{j^n} \neq y_{j^{n+1}}, x_{j^n} = x_{j^{n+1}}$ . (4.17)

– Ограничение на число уровней в каналах:

$$\begin{aligned} & \left( z_{c'} - l_{c'} - \frac{d_{c'}}{2} \right) - \left( z_{c''} - l_{c''} - \frac{d_{c''}}{2} \right) = 0 \vee \\ & \vee \left( z_{c'} - l_{c'} - \frac{d_{c'}}{2} \right) - \left( z_{c''} - l_{c''} - \frac{d_{c''}}{2} \right) = 0 \vee \\ & \vee \left( z_{c''} - l_{c''} - \frac{d_{c''}}{2} \right) - \left( z_{c'} - l_{c'} - \frac{d_{c'}}{2} \right) = 0. \end{aligned} \quad (4.18)$$

– Ограничение на длину трубопровода:

$$\sum_{n=a}^{k_{j-1}} (|x_{j^{n+1}} - x_{j^n}| + |y_{j^{n+1}} - y_{j^n}| + |z_{j^{n+1}} - z_{j^n}|) \leq \delta_j, \quad \forall j \in M^{23}. \quad (4.19)$$

– На расположение трубопроводов с высокотемпературными носителями в каналах:

$$\rho(c', c'') \geq \frac{d_{j'} + d_{j''}}{2} + l_{j'} + l_{j''} + l_{rx}, \quad \forall j' \in M_r^{26}, \quad \forall j'' \in M_x^{26}. \quad (4.20)$$

– На расположение трубопроводов с взрывчатыми, горючими, легковоспламеняющимися и агрессивными веществами:

$$\begin{aligned} & ((\rho(c', c'') \leq l_{br}) \wedge (z_{c'} \geq z_{c''})) \vee ((\rho(c', c'') \geq l_{br}), \\ & \forall c' \in T_{j'} \in M_{br}^{27}, \quad \forall c'' \in T_{j''} \in M_{ka}^{27}. \end{aligned} \quad (4.21)$$

– На мощность электродвигателя насоса:

$$N_j \geq N_{\max} = m \frac{\rho_j g Q_j H_j}{1000 \eta_j}. \quad (4.22)$$

– Непересечение трасс друг с другом:

$$\rho(c', c'') \geq \frac{d_{j'} + d_{j''}}{2} + l_{j'} + l_{j''} + l_T, \quad \forall j', j'' \in M^{31}. \quad (4.23)$$

– Непересечение трасс с аппаратами:

$$\left( |x_i - x_{c'}| \geq \frac{a_i + d_j}{2} + S_i + l_j + l_a \right) \vee \left( |y_i - y_{c'}| \geq \frac{b_i + d_j}{2} + S_i + l_j + l_a \right). \quad (4.24)$$

– Непересечение трасс с колоннами:

$$\left( |\bar{x}^k - x_{c'}| \geq \frac{\bar{\beta}_x + d_j}{2} + l_j + l_k \right) \vee \left( |\bar{y}^k - y_{c'}| \geq \frac{\bar{\beta}_y + d_j}{2} + l_j + l_k \right). \quad (4.25)$$

– Наличие зон, запретных для прокладки трубопроводов:

$$\begin{aligned} & \left( |x_m - x_{c'}| \geq \frac{\bar{a}_m + d_j}{2} + l_j \right) \vee \left( |y_m - y_{c'}| \geq \frac{\bar{b}_m + d_j}{2} + l_j \right) \vee \\ & \vee \left( |z_m - z_{c'}| \geq \frac{\bar{c}_m + d_j}{2} + l_j \right). \end{aligned} \quad (4.26)$$

– Критерий трассировки технологических трубопроводов в многоэтажных цехах:

$$S^2 = (SK_4^2 + SK_5^2 + SK_6^2)E_n + SE_1^2 + SE_2^2. \quad (4.27)$$

#### 4.2.2. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ТРАССИРОВКИ ТРУБОПРОВОДОВ

Все методы трассировки можно разделить на две группы.

*Топографические* – методы, в которых приоритет отдается метрическому аспекту задачи, предполагающему учет конструктивных размеров аппаратов, соединений и пространства трассировки.

*Графотеоретические* – методы трассировки, основанные на топологическом аспекте задач, который связан с выбором допустимого пространственного расположения отдельных технологических соединений при ограничении на число пересечений, число уровней и т.д.

Наиболее известными алгоритмами трассировки соединений являются следующие:

- волновой алгоритм и его модификации;
- алгоритмы трассировки по магистралям;
- лучевые;
- эвристические алгоритмы.

Волновые алгоритмы позволяют получать решения оптимальные по ряду показателей, но требуют больших затрат машинного времени. Причем, для генерирования волны используется 90 % времени.

Лучевые алгоритмы очень эффективны для выполнения трассировки несложной конфигурации. Обладают высоким быстродействием, но зачастую не могут реализовать соединения.

Эвристические алгоритмы основаны на учете специфической особенности задачи и зачастую дают хорошие решения за короткое время.

Использование алгоритмов трассировки по магистралям приводит к сокращению числа рассматриваемых вариантов, в результате эти алгоритмы обладают большим быстродействием.

В структуре соединений ТП можно выделить два вида соединений ТП: простое – связывающее только два аппарата; и разветвленное – связывающее три и более аппаратов, один из которых, как правило, – источник, а остальные – стоки или наборот.

#### 4.2.3. ПРОЦЕДУРНАЯ МОДЕЛЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТРАССИРОВКИ ТРУБОПРОВОДОВ

В математическое обеспечение системы компоновки включены следующие алгоритмы трассировки: двухлучевой – для реализации соединений простых связей и алгоритм построения кратчайшего связывающего дерева (КСД) – для разветвленного ТП. Оба алгоритма ориентированы на представление пространства трассировки в виде системы ортогональных каналов, внутри которых осуществляется прокладка трасс трубопроводов.

Формирование каналов осуществляется в соответствии с правилами трассировки ТП. Вдоль цеха – продольные каналы (под ригелями на отметке от 2,5 до 4 м), поперек цеха – поперечные каналы (в зоне ригелей от 4 до 5,5 м). Емкость (размеры) каждого канала определяется в зависимости от плана расположения оборудования, зон ремонта и т.д.

Таким образом область трассировки можно представить в виде ортогонального графа  $Q = (v, u)$ , вершины которого  $v = \{v_i | i = 1, 2, \dots, k_p\}$  соответствуют пересечениям каналов, а ребра  $u = \{u_j | j = 1, 2, \dots, t\}$  – участкам каналов.

**Рассмотрим работу алгоритмов при трассировке.**

##### ***Двухлучевой алгоритм трассировки***

1. Определяется взаимное расположение аппаратов, которые надо соединять. Если аппараты размещены на разных этажах, определяется этаж, где будут проходить горизонтальные составляющие трассы.
2. В зависимости от взаимного расположения аппаратов, выбираются по два направления от каждого аппарата, по которым будут распространяться лучи.
3. Осуществляется построение трассы от штуцера аппарата до ближайшего канала.
4. С шагом, равным расстоянию между каналами, осуществляется распространение лучей в соответствии с выбранными направлениями.
5. Распространение лучей заканчивается, если встретятся два разноименных луча.
6. В случае возникновения препятствия распространение луча в выбранном направлении прекращается и делается попытка продвижения в другом направлении.

Рассмотрим пример прокладки трассы трубопровода для соединения аппаратов  $A$  и  $B$ . На рис. 4.2 показан план этажа цеха с системой взаимно перпендикулярных каналов, которые изображены пунктирными линиями.  $X$  – места входов и выходов трасс трубопроводов в канал. Символом обозначены колонны. Обозначим направление движения лучей как 1( $\uparrow$ ); 2( $\rightarrow$ ); 3( $\downarrow$ ); 4( $\leftarrow$ ). Тогда с учетом взаимного расположения аппаратов, местами возможного входа трассы трубопровода в канал будут точки  $A_1$  и  $A_2$  для аппарата  $A$  и точки  $B_3$ ,  $B_4$  для аппарата  $B$ .

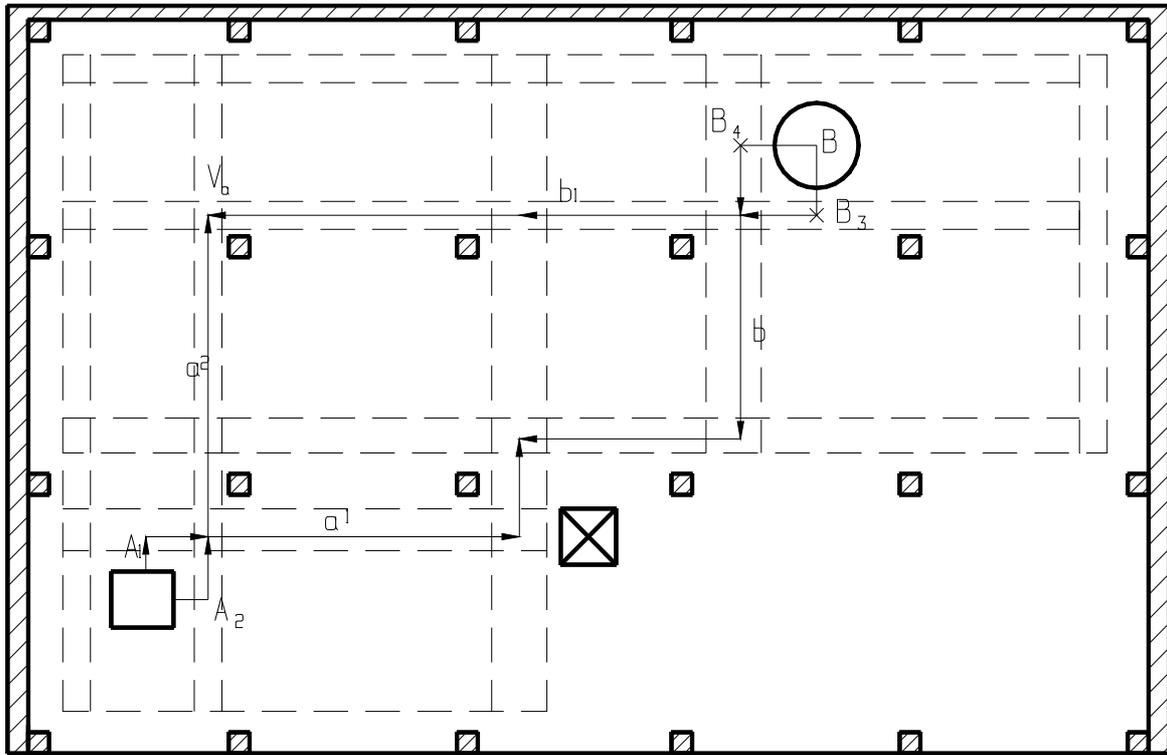


Рис. 4.2. Работа двухлучевого алгоритма трассировки

От каждого аппарата будем распространять два луча:

$a^1$  – от точки  $A_1$  вправо и  $a^2$  – от точки  $A_2$  вверх;

$b^1$  – от точки  $B_3$  влево и  $b^2$  – от  $B_4$  вниз.

Если аппарат  $B$  будет левее  $A$ , то путевые координаты вправо и влево надо поменять местами. Одновременно будем распространять все четыре луча до встречи двух разноименных лучей в точке  $V_*$  либо до блокирования всех лучей. Продвижение лучей по каналу будем осуществлять с шагом, соответствующим расстоянию между каналами.

Для реализации соединения воспользуемся матрицей пересечения каналов

$$P_{ij} \| i, j \|_{k \text{ пр } k \text{ поп}},$$

где  $P_{ij} = \begin{cases} 0; \\ 1, \end{cases}$  0 – не пересекаются, 1 – пересекаются.

Распределение лучей закончится, когда после очередного шага будет выполнено одно из условий:  $P_{r(a^1)r(b^2)}=1$  или  $P_{r(a^2)r(b^1)}=1$ , где  $r(a^1), r(a^2), r(b^2), r(b^1)$  – соответственно номера каналов, в которых находятся лучи  $a^1, b^1, a^2, b^2$ . Рассмотрим несколько частных случаев:

1. Аппараты  $A$  и  $B$  размещены в одном продольном ряде. Для соединения аппаратов в этом случае достаточно выполнить условия  $r(a^1) = r(b^2)$  или  $r(a^2) = r(b^1)$ , т.е. трассировка заканчивается, как только лучи попадают в один и тот же канал.

2. Аппараты  $A$  и  $B$  размещены в одном поперечном ряде (по ширине цеха).

В этом случае должно выполняться условие:

$$r(a^2) = r(b^2) \quad \text{или} \quad r(a^4) = r(b^4).$$

3. Аппараты  $A$  и  $B$  размещены в одной строительной клетке.

Для этого случая допускается прямое соединение аппаратов, без выхода в канал.

Как правило, получается два варианта трассировки. Выбор лучшего варианта осуществляется по критерию минимальной длины трассы. Если длина трасс одинакова, то предпочтение отдается трассе с меньшим числом поворотов.

### Процедура прокладки трасс для разветвленных ТП

Решение задачи выполняется в два этапа.

На первом этапе с использованием алгоритма Краскала производится построение КСД-дерева Прима.

На втором этапе для каждого ребра дерева Прима формируется множество реализующих его вариантов  $S$ -ребер (под  $S$ -ребром понимается цепь ребер в ортогональном графе  $Q$ , имеющая началом и концом две вершины  $V_i, V_j$ ), покрывающих

минимальное дерево Штейнера, и выбираем  $S$ -ребро, обеспечивающее минимальную суммарную длину дерева Штейнера. Этот процесс повторяется для всех разветвленных ТП.

### Алгоритм построения КСД

1. Для заданного подмножества вершин  $k^t$ , на которых надо построить КСД, вычисляется расстояние между всеми вершинами и заносится в матрицу  $D = \|d_{ij}\|_{k^t \times k^t}$ .

2. Определяется ребро с минимальным весом.

3. Определяется следующее ребро. При этом новое ребро не должно совпадать с уже выбранным.

Процесс повторяется до построения  $(k^t - 1)$ -го ребра.

Полученный список ребер и является искомым деревом Прима с минимальным весом. Проиллюстрируем сказанное на примере (рис. 4.3).

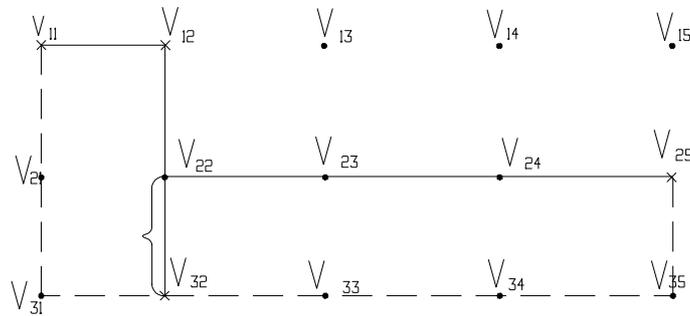
Пусть надо построить связывающую сеть (СС) на трех вершинах  $V_{11}, V_{25}, V_{32}$ . Для простоты расстояние между двумя смежными вершинами возьмем равным 1.

1. Вычисляем расстояние между вершинами:

$$d(V_{11}, V_{25}) = 5; \quad d(V_{11}, V_{32}) = 3; \quad d(V_{25}, V_{32}) = 4.$$

2. Определяем ребра КСД:

а)  $V_{11} - V_{32}$ ;   б)  $V_{32} - V_{25}$ .



**Рис. 4.3. Пример построения кратчайшей связывающей сети в ортогональном графе**

3. Формируем два варианта  $S$ -ребер для каждого из ребер  $V_{11} - V_{32}$  и  $V_{32} - V_{25}$  по каналам прямоугольной зоны, внутри которой лежат вершины. Это варианты:

$V_{11}, V_{21}, V_{31}, V_{32}$  и  $V_{11}, V_{12}, V_{22}, V_{32}$  для ребра  $V_{11} - V_{32}$ ;

$V_{32}, V_{22}, V_{23}, V_{25}$  и  $V_{32}, V_{33}, V_{34}, V_{35}, V_{25}$  для ребра  $V_{32} - V_{25}$ .

4. Каждое  $S$ -ребро моделируем в матрице  $P$ , увеличивая на единицу значение  $P_{ij}$ , если хоть один вариант  $S$ -ребра проходит через вершину  $V_{ij}$ :

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

5. Окончательно выбираем те варианты  $S$ -ребер, которые проходят через вершину с максимальными значениями  $P_{ij}$ . В данном примере соответственно получаем  $S$ -ребра:

$$V_{11}, V_{12}, V_{22}, V_{32} \quad \text{и} \quad V_{32}, V_{22}, V_{23}, V_{24}, V_{25}.$$

Фрагмент  $V_{22}, V_{32}$  для этих ребер является общим, что позволяет уменьшить общую длину связывающей сети.

## 5. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЦЕХАХ АНГАРНОГО ТИПА

Наряду с проектированием производств в многоэтажных цехах, строящихся из типовых железобетонных конструкций, часто проектирование производств осуществляется в цехах ангарного (павильонного) типа. Проектирование в цехах ангарного типа имеет ряд преимуществ по сравнению с многоэтажными цехами. Наиболее важными из них являются отсутствие жесткой привязки высотных отметок расположения оборудования к высотным отметкам этажей цеха, меньшие сроки строительства цехов и возможность быстрой их реконструкции, монтаж оборудования на металлоконструкциях. Данные отличия дают проектировщикам возможность более гибкого варьирования высотного расположения оборудования для обеспечения оптимального режима транспортировки веществ, снижения затрат на трубопроводы и насосы, улучшения условий обслуживания оборудования и его монтажа. Нахождение оптимального варианта размещения технологического оборудования имеет существенное значение, так как влияет не только на стоимость проектируемого производства, но и на удобство работы людей и безопасность производства.

Для решения задачи размещения оборудования в цехах ангарного типа необходимо также проведение вспомогательных расчетов (гидравлических, тепловых и прочностных) с определением режима транспортировки, диаметров трубопроводов, времени транспортировки, необходимого избыточного давления в аппаратах для перекачивания и т.д. Эти расчеты особенно важны при проектировании малотоннажных многоассортиментных производств, так как в них на одной технологической схеме выпускается несколько продуктов и необходимо точно знать время загрузки сырья в аппараты, выгрузки готовой продукции, промежуточной транспортировки реакционной массы.

Решение данной задачи зависит от множества трудно формализуемых факторов, что существенно затрудняет автоматизацию поиска оптимального варианта размещения технологического оборудования.

### 5.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЦЕХАХ АНГАРНОГО ТИПА

Для отбора наилучшего варианта размещения из множества допустимых необходимо принять критерий оптимальности. В данном случае целесообразно использовать критерий приведенных затрат, включающий в себя капитальные и эксплуатационные затраты:

$$S = SK E_n + SE, \quad (5.1)$$

где  $S$  – критерий оптимальности (приведенные затраты);  $SK$ ,  $SE$  – капитальные и эксплуатационные затраты;  $E_n$  – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений.

*К капитальным затратам относятся:*

- стоимость монтажа оборудования;
- стоимость металлоконструкций;
- стоимость строительных конструкций цеха;
- стоимость транспортных трубопроводных сетей;
- стоимость устройств для транспортировки веществ (насосы, компрессорные установки);
- стоимость трубопроводной арматуры.

*Стоимость монтажа оборудования*

$$SK1 = \sum_{i=1}^I M_i, \quad (5.2)$$

где  $M_i$  – стоимость монтажа  $i$ -й единицы оборудования;  $I$  – общее число единиц размещаемого оборудования.

*Стоимость металлоконструкций*

$$SK2 = \sum_{i=1}^I MK_i, \quad (5.3)$$

где  $MK_i$  – стоимость металлоконструкций для  $i$ -й единицы оборудования.

*Стоимость строительных конструкций цеха*

$$SK3 = N_c Z_c + N_k Z_k; \quad (5.4)$$

$$N_c = 2(AC + BC); \quad (5.5)$$

$$N_k = AB, \quad (5.6)$$

где  $N_c$  – площадь стен ангарного цеха,  $m^2$ ;  $Z_c$  – затраты на строительство  $1 m^2$  стен цеха;  $N_k$  – площадь крыши ангарного цеха,  $m^2$ ;  $Z_k$  – затраты на строительство  $1 m^2$  крыши цеха;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – длина, ширина и высота ангарного цеха,  $m$ .

Если габариты цеха являются варьируемым параметром, то они представляют собой функцию от координат аппаратов:

$$A, B, C = f(X_i, Y_i, Z_i), \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (5.7)$$

где  $X_i, Y_i, Z_i$  – координаты  $i$ -го аппарата.

*Стоимость технологических трубопроводов*

$$SK4 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=i}^I (R_{ij} \sum_{k=1}^K L_{ijk} C_{ijk}), \quad i \neq j, \quad (5.8)$$

где  $R$  – матрица размерностью  $[I \times I]$ ;  $L_{ijk}$  – длина  $k$ -й связи между аппаратами  $i$  и  $j$ ;  $C_{ijk}$  – стоимость одного метра  $k$ -го трубопровода между аппаратами  $i$  и  $j$ ;  $K$  – общее число связей между аппаратами  $i$  и  $j$ .

Длина  $k$ -го трубопровода между аппаратами  $i$  и  $j$  рассчитывается следующим образом:

$$L_{ijk} = |X_{ik} - X_{jk}| + |Y_{ik} - Y_{jk}| + |Z_{ik} - Z_{jk}|, \quad (5.9)$$

где  $X_{ik}, Y_{ik}, Z_{ik}$  – координаты штуцера аппарата  $i$  (источника);  $X_{jk}, Y_{jk}, Z_{jk}$  – координаты штуцера аппарата  $j$  (приемника).

*Затраты на устройства для транспортировки веществ.* Затраты на транспортные средства представляют собой затраты на устройства, необходимые для обеспечения передачи материальных потоков из одного аппарата в другой за заданное время с заданным расходом.

Задача усложняется тем, что для каждого трубопровода при каждом варианте размещения необходимо проводить гидравлические расчеты для подбора способа транспорта (насос, самотек, перекачивание), сравнения затрат на тот или иной вид транспорта и выбор оптимального.

Затраты на транспортные устройства можно записать следующим образом:

$$SK5 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=i}^I (R_{ij} \sum_{k=1}^K \beta_{ijk} CT_{ijk}), \quad i \neq j, \quad (5.10)$$

где  $R_{ij}$  – коэффициент, принимающий значение 0, если аппараты  $i$  и  $j$  не связаны трубопроводом, и 1, если аппараты  $i$  и  $j$  связаны трубопроводом;  $\beta_{ijk}$  – коэффициент, принимает значение 0, если для транспортировки через  $k$ -ю связь между аппаратами  $i$  и  $j$  не требуется установки какого-либо устройства (самотек), и 1 в обратном случае;  $CT_{ijk}$  – стоимость устройства, необходимого для транспортировки материальных потоков через  $k$ -ю связь между аппаратами  $i$  и  $j$ .

Стоимость устройств для транспортировки веществ – это функция, зависящая от геометрии аппаратов, соединяемых  $k$ -м трубопроводом, направления транспортировки материальных потоков, времени, за которое необходимо произвести транспортировку, взаимного расположения аппаратов и от характеристик веществ и трубопровода.

*Стоимость трубопроводной арматуры*

$$SK6 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=i}^I (R_{ij} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M CA_{ijkm}), \quad i \neq j, \quad (5.11)$$

где  $CA_{ijkm}$  – стоимость  $m$ -й единицы арматуры на  $k$ -й связи между аппаратами  $i$  и  $j$ .

*Капитальные затраты*

$$SK = SK1 + SK2 + SK3 + SK4 + SK5 + SK6. \quad (5.12)$$

Подставляя зависимости из уравнений (5.2) – (5.11) в уравнение (5.12), получим:

$$SK = \sum_{i=1}^I (M_i + MK_i) E_n + (N_c Z_c + N_k Z_k) E_n + \sum_{i=1}^I \sum_{j=i}^I \left( R_{ij} \sum_{k=1}^K (L_{ijk} C_{ijk} + \beta_{ijk} CT_{ijk}) + \sum_{m=1}^M CA_{ijkm} \right) E_n. \quad (5.13)$$

*К эксплуатационным затратам относятся:*

- стоимость электроэнергии, затрачиваемой на транспортировку веществ;
- потери тепловой энергии от трубопроводов;
- затраты на ремонт оборудования.

*Стоимость электроэнергии, затрачиваемой на транспортировку веществ:*

$$SE1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=i}^I \left( R_{ij} \sum_{k=1}^K \beta_{ijk} NT_{ijk} CЭЭт_{экс} \right), \quad (5.14)$$

где  $NT_{ijk}$  – мощность устройства для транспортировки веществ через  $k$ -ю связь между аппаратами  $i$  и  $j$ , кВт; СЭЭ – стоимость 1 кВт·ч,  $\frac{p}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ ;  $t_{\text{экс}}$  – время эксплуатации устройства для транспортировки веществ через  $k$ -ю связь между аппаратами  $i$  и  $j$ , ч.

*Потери тепловой энергии от трубопроводов*

$$SE2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=i}^I \left( R_{ij} \sum_{k=1}^K \alpha_{ijk} (Tn_{ijk} - T_{\text{cp}}) \Pi_{ijk} \text{СТЭ} \right), \quad (5.15)$$

где  $\Pi_{ijk}$  – площадь поверхности контакта  $k$ -го трубопровода с окружающей средой, м<sup>2</sup>;  $\alpha_{ijk}$  – общий коэффициент лучисто-конвективного теплообмена на нагретой поверхности,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ; СТЭ – стоимость 1 Вт тепловой энергии, р./Вт;  $Tn_{ijk}$  – температура поверхности  $k$ -го трубопровода между аппаратами  $i$  и  $j$ ;  $T_{\text{cp}}$  – температура окружающей среды.

$$\Pi_{ijk} = f(d_{ijk}, L_{ijk});$$

$$SE2 = f(d_{ijk}, L_{ijk}, Tn_{ijk}, T_{\text{cp}}).$$

*Стоимость ремонта оборудования*

$$SE3 = \sum_{i=1}^I (CKR_i KR_i + CTR_i TR_i), \quad (5.16)$$

где  $CKR_i$  – стоимость капитального ремонта  $i$ -й единицы оборудования;  $KR_i$  – число капитальных ремонтов  $i$ -й единицы оборудования за срок эксплуатации;  $CTR_i$  – стоимость текущего ремонта  $i$ -й единицы оборудования;  $TR_i$  – число текущих ремонтов  $i$ -й единицы оборудования за срок эксплуатации.

*Эксплуатационные затраты*

$$SE = SE1 + SE2 + SE3. \quad (5.17)$$

Подставляя зависимости из уравнений (5.14) – (5.16) в уравнение (5.17), получим:

$$SE = \sum_{i=1}^I (CKR_i KR_i + CTR_i TR_i) + \beta_{ijk} NT_{ijk} \text{СЭЭ} t_{\text{экс}} + \alpha_{ijk} (Tn_{ijk} - T_{\text{cp}}) \Pi_{ijk} \text{СТТ}. \quad (5.18)$$

*Общий критерий (приведенные затраты)*

$$S = E_{\text{н}} SK + SE = E_{\text{н}} (SK1 + SK2 + SK3 + SK4 + SK5 + SK6) + SE1 + SE2 + SE3. \quad (5.19)$$

### 5.1.1. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ТС В ЦЕХАХ АНГАРНОГО ТИПА

При размещении технологического оборудования необходимо учитывать ряд ограничений, продиктованных условиями функционирования ХТС, требованиями нормативных документов, возможностью и удобством монтажа и обслуживания оборудования.

Для формализации ограничений примем следующие допущения:

- принята прямоугольная система координат  $XYZO$ ;
- все объекты, участвующие в процессе размещения (аппараты, металлоконструкции, отрезки трубопроводов и т.д.) аппроксимируются параллелепипедами;
- габаритные размеры параллелепипедов включают зоны обслуживания аппаратов;
- объекты пересекаются, если пересекаются множества точек пространства, замкнутые в соответствующих параллелепипедах;
- аппараты могут перемещаться по трем координатам ( $X, Y, Z$ ) в принятой прямоугольной системе координат и вращаться вокруг оси, параллельной оси  $OZ$ , проходящей через центр параллелепипеда на угол кратный  $90^\circ$  ( $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ$ ).

С учетом принятых допущений и обозначений основные ограничения математической модели можно записать следующим образом.

– При размещении объекты не должны пересекаться:

непересечение аппаратов с аппаратами:

$$U_i \cap U_k = \emptyset, \quad i = 1, 2, \dots, I; \quad k = 1, 2, \dots, I; \quad i \neq k. \quad (5.20)$$

непересечение аппаратов с остальными объектами:

$$U_i \cap V_j = \emptyset, \quad i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (5.21)$$

– Координаты аппаратов варьируются в заданном диапазоне:

$$\begin{cases} X_i = [X_{i*}; X_i^*]; \\ Y_i = [Y_{i*}; Y_i^*]; \\ Z_i = [Z_{i*}; Z_i^*], \end{cases} \quad (5.22)$$

$i = 1, 2, \dots, I$ .

Данное ограничение наиболее важно при размещении оборудования в помещениях с разной категорией по взрывопожарной и пожарной опасности.

– Аппараты могут быть зафиксированы:

$$X_i, Y_i, Z_i = \text{const}. \quad (5.23)$$

– Габариты цеха варьируются в заданном диапазоне:

$$\begin{cases} A_* \leq A \leq A^*; \\ B_* \leq B \leq B^*; \\ C_* \leq C \leq C^*. \end{cases} \quad (5.24)$$

– Зоны, в пределах которых не должно размещаться оборудование (проходы, входы, выходы из цеха и т.д.):

$$U_i \cap H_z = \emptyset, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad z = 1, 2, \dots, Z. \quad (5.25)$$

– Расстояние между аппаратами не должно быть менее допустимого:

$$\rho(U_i, U_k) \geq [\rho 1]_{ik}, \quad i \neq k. \quad (5.26)$$

– Расстояние между аппаратами и строительными конструкциями не должно быть менее допустимого:

$$\rho(U_i, SK) \geq [\rho 2]_i, \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (5.27)$$

– Расположение аппаратов должно обеспечивать транспорт веществ самотеком, если это задано в исходных данных.

Если транспорт через  $k$ -й трубопровод из аппарата  $i$  в аппарат  $j$  необходимо обеспечить самотеком, то разность высот расположения аппаратов должна быть не меньше расчетной, при которой транспорт самотеком будет обеспечен.

$$Z_i - Z_j \geq \Delta Z_p, \quad i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, I; \quad i \neq j. \quad (5.28)$$

Разность высот между аппаратами – это функция, зависящая от геометрии аппаратов, соединяемых  $k$ -м трубопроводом, направления транспортировки материальных потоков, времени, за которое необходимо произвести транспортировку, взаимного расположения аппаратов и от характеристик веществ и трубопровода.

При решении задачи размещения технологического оборудования также необходимо учитывать ряд ограничений, продиктованных условиями удобства обслуживания и ремонта оборудования.

– Однотипное оборудование может быть выстроено в ряды:

$$Y_i = Y_j, \quad Z_i = Z_j, \quad i = 1, 2, \dots, I_1; \quad j = 1, 2, \dots, I_1. \quad (5.29)$$

Учитывая все вышеизложенное, постановка задачи размещения оборудования в цехах ангарного типа формулируется так:

найти такие  $X_i, Y_i, Z_i, \varphi_i, d_{ijk}, L_{ijk}$ , при которых  $S(X_i, Y_i, Z_i, \varphi_i, t_{ijk}, \rho_{ijk}, \mu_{ijk}, \Delta_{ijk}, d_{ijk}, L_{ijk}) \rightarrow \min$ , и выполняются ограничения математической модели (5.20) – (5.29).

### 5.1.2. ПРОЦЕДУРНАЯ МОДЕЛЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ТС В ЦЕХАХ АНГАРНОГО ТИПА

Задача поиска оптимального решения размещения объектов относится к комбинаторному типу, в основе решения таких задач лежат процедуры порождения элементов конечного множества, указанного в условии задачи, проверка их соответствия заданным условиям и выделение, перечисление или подсчет количества элементов в них. Когда число вариантов решения велико, поиск среди них оптимального простым перебором затруднителен, а в ряде случаев практически невозможен. Большое распространение получили комбинаторные алгоритмы, основанные на организации элементов анализируемого множества в виде дерева или графов.

Так как при размещении оборудования в цехах ангарного типа отсутствует дискретность по координатам, то проблематично применение алгоритмов, требующих выявлять заранее возможные местоположения аппаратов. Для нахождения оптимального варианта размещения оборудования применен метод, основанный на алгоритме покоординатного спуска. Суть метода заключается в последовательном перемещении каждой единицы оборудования в пространстве последовательно по трем координатам в положительном и отрицательном направлении. В случае, если при перемещении оборудования значение критерия ухудшилось, то происходит возврат. Возврат также происходит, если при перемещении объектов нарушается хотя бы одно из наложенных ограничений. Перемещение оборудования производится на величину шага, который дробится в случае, если при перемещении каждой единицы оборудования во всех направлениях не происходит улучшения. Последовательность перемещения оборудования определяется количеством трубопроводов каждой единицы оборудования. Первым размещается аппарат, имеющий наибольшее количество связей. Оптимизация заканчивается в случае, когда при шаге меньшем или равном минимальному не происходит улучшения критерия. Результат размещения технологического оборудования с применением данной процедуры существенно зависит от начального расположения оборудования.

Рассмотренная выше постановка задачи размещения технологического оборудования в цехах ангарного типа [16, 31] и процедура поиска оптимального решения [30] реализованы в информационно-графической системе компоновки технологического оборудования [18, 25, 29].

## 5.2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАССИРОВКИ ТРУБОПРОВОДОВ

Проектирование компоновки ХТС является сложным процессом, предусматривающим решение задач размещения оборудования и трассировки трубопроводов. Соединение оборудования технологическими трубопроводами – один из ключевых этапов. От правильного решения этой задачи в значительной степени зависят затраты на проектируемый объект.

Исходными данными для задачи трассировки [17] являются: физико-химические данные о транспортируемых продуктах (плотность, вязкость, процентное содержание твердых частиц и др.); данные с этапа расчета аппаратного оформления ХТС (число аппаратов, габариты оборудования, структура связей между аппаратами); а также данные, полученные в результате решения задачи размещения (габариты цеха, координаты размещения оборудования в цехе и строительных конструкций).

Словесная постановка задачи трассировки технологических трубопроводов формулируется так: найти, с учетом всех правил, требований и ограничений, такое пространственное расположение технологических трубопроводов, при которых приведенные затраты на проектируемый объект минимальны.

### 5.2.1. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ТРАССИРОВКИ ТРУБОПРОВОДОВ ТС В ЦЕХАХ АНГАРНОГО ТИПА

Для описания процесса трассировки введем ряд допущений:

- Рассматривается прямоугольная система координат  $XYZO$ .
- Все объекты, участвующие в процессе трассировки, аппроксимируются параллелепипедами, отрезки трубопровода – цилиндрами.
- Объекты пересекаются, если пересекаются соответствующие параллелепипеды или цилиндры.

Введем обозначения.

Структуру связей между аппаратами зададим в виде матрицы связей:

$$SV = \{1, \dots, NA, 1, \dots, NA, 1, \dots, FS\},$$

где  $NA$  – число аппаратов ХТС;  $FS$  – общее количество физико-химических свойств.

$SV_{ij1}$  – признак наличия технологической связи между  $i$ -м и  $j$ -м аппаратами.

$SV_{ij1} = 1$  – при наличии технологической связи между  $i$ -м и  $j$ -м аппаратами, иначе  $SV_{ij1} = 0$ .

$SV_{ij2}$  – стоимость 1-го метра трубопровода между  $i$ -м и  $j$ -м аппаратами.

$SV_{ij3}$  – признак, определяющий способ транспортировки веществ по связям.  $SV_{ij3} = 1$  – самотек,  $SV_{ij3} = 2$  – передавливание,  $SV_{ij3} = 3$  – транспортировка насосом.

$SV_{ij4}$  – признак, различающий разветвленный трубопровод от неразветвленного.  $SV_{ij4} = 0$  – если неразветвленный трубопровод, иначе  $SV_{ij4} = n$ , где  $n$  – номер разветвленного трубопровода.

$SV_{ijk}$  – физико-химические свойства вещества,  $k = 5, \dots, FS$ .

$TRAS_j = \{\sum_i^{NF} (xnt_{ji}, ynt_{ji}, znt_{ji}, xkt_{ji}, ykt_{ji}, zkt_{ji}, d_{ji})\}$  – пространственное расположение  $j$ -й трассы,  $j = 1, \dots, NT$  – число технологических связей:

$(xnt_{ji}, ynt_{ji}, znt_{ji}, xkt_{ji}, ykt_{ji}, zkt_{ji}, d_{ji})$  –  $i$ -й фрагмент,  $i=1, \dots, NF$ ,  $NF$  – число фрагментов в  $j$ -й трассе;

$xnt_{ji}, ynt_{ji}, znt_{ji}$  – координаты начала  $i$ -го фрагмента трассы  $j$ -го трубопровода;

$xkt_{ji}, ykt_{ji}, zkt_{ji}$  – координаты конца  $i$ -го фрагмента трассы  $j$ -го трубопровода;

$d_{ji}$  – диаметр трубопровода, при этом фрагменты  $i$  и  $I + 1$  одной трассы удовлетворяют условию:

$$\begin{cases} xkt_{ji} = xnt_{ji} + 1; \\ ykt_{ji} = ynt_{ji} + 1; \\ zkt_{ji} = znt_{ji} + 1. \end{cases} \quad (5.30)$$

$APP_i = (xa_i, ya_i, za_i, gxa_i, gya_i, gza_i)$  – пространственное расположение  $i$ -го аппарата,  $i=1, \dots, NA$  – число аппаратов, где  $xa_i, ya_i, za_i$  – координаты точки пересечения диагоналей параллелепипеда;  $gxa_i, gya_i, gza_i$  – габариты параллелепипеда.

Под строительными конструкциями будем понимать совокупность колонн, перекрытий, металлоконструкций, фундаментов и опор.

$KON_i = (xk_i, yk_i, zk_i, gxk_i, gyk_i, gzk_i)$  – пространственное расположение  $i$ -й конструкции,  $i=1, \dots, NK$  – число конструкций, где  $xk_i, yk_i, zk_i$  – координаты точки пересечения диагоналей параллелепипеда, описывающего  $i$ -ю единицу строительных конструкций;  $gxk_i, gyk_i, gzk_i$  – габариты параллелепипеда.

По условиям производства должны быть предусмотрены зоны, запретные для прокладки трубопроводов (например, зоны для щитов КИП, монтажные проемы, проходы людей и др.).

$ZZ_i = (xz_i, yz_i, zz_i, gxz_i, gyz_i, gzz_i)$  – пространственное расположение  $i$ -й запретной зоны для прокладки трубопровода,  $i=1, \dots, NZ$  – число запретных зон, где  $xz_i, yz_i, zz_i$  – координаты точки пересечения диагоналей параллелепипеда.

$gxz_i, gyz_i, gzz_i$  – габариты параллелепипеда.

– Пространственное размещение оборудования

$$APP = \{APP_i | i=1, \dots, NA\}.$$

– Пространственное размещение запретных зон

$$ZZ = \{ZZ_i | i=1, \dots, NZ\}.$$

– Пространственное размещение конструкций

$$KON = \{KON_i | i=1, \dots, NK\}.$$

– Пространственный вариант трассировки трубопровода

$$TRAS = \{TRAS_i | i=1, \dots, NT\}.$$

С учетом введенных обозначений установим основные ограничения математической модели, которые должны быть выполнены при трассировке.

*Прокладка трубопроводов осуществляется в ортогональной метрике параллельно стенам цеха:*

$$\begin{cases} (xnt_{ji} - xkt_{ji})(ynt_{ji} - ykt_{ji}) = 0; \\ (xnt_{ji} - xkt_{ji})(znt_{ji} - zkt_{ji}) = 0; \\ (ynt_{ji} - ykt_{ji})(znt_{ji} - zkt_{ji}) = 0, \end{cases} \quad (5.31)$$

где  $i=1, \dots, NF$ ;  $j=1, \dots, NT$ .

*Трассы трубопроводов должны прокладываться в пределах цеха:*

$$\begin{cases} xnt_{ji}, xkt_{ji} \in [xch_*, xch^*]; \\ ynt_{ji}, ykt_{ji} \in [ych_*, ych^*]; \\ znt_{ji}, zkt_{ji} \in [zch_*, zch^*], \end{cases} \quad (5.32)$$

где  $i=1, \dots, NF$ ;  $j=1, \dots, NT$ ,  $xch_*, xch^*, ych_*, ych^*, zch_*, zch^*$  – нижние и верхние пределы размеров цеха по соответствующим координатам.

Скорость потока в трубопроводе должна быть в пределах рекомендуемых границ:

$$\omega_j^H \leq \omega_j \leq \omega_j^B; \quad (5.33)$$

$$\omega_j = \frac{Q_j}{0,785 d_j^2}; \quad j=1, \dots, NT,$$

где  $\omega_j$  – скорость потока в  $j$ -м трубопроводе;  $\omega_j^H, \omega_j^B$  – рекомендуемые нижняя и верхняя границы скорости потока (м/с) в  $j$ -м трубопроводе;  $Q_j$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с.

Минимальное расстояние между участками трасс должно быть не менее допустимого:

$$R(TRAS_i, TRAS_j) \geq [R_T], \quad j=i+1, \dots, NF, \quad i=1, \dots, NF, \quad (5.34)$$

где  $R(TRAS_i, TRAS_j)$  – расстояние между  $i$ -м и  $j$ -м трубопроводом;  $R_T$  – допустимое расстояние между трубопроводами.

Минимальное расстояние между участками трасс и аппаратами должно быть не менее допустимого:

$$R(APP_i, TRAS_j) \geq [R_a], \quad i=1, \dots, NA, \quad j=1, \dots, NF, \quad (5.35)$$

где  $R(APP_i, TRAS_j)$  – расстояние между  $i$ -м аппаратом и  $j$ -м трубопроводом;  $R_a$  – допустимое расстояние между трубопроводом и аппаратом.

Минимальное расстояние между участками трасс и конструкциями должно быть не менее допустимого:

$$R(KON_i, TRAS_j) \geq [R_k], \quad i=1, \dots, NK, \quad j=1, \dots, NF, \quad (5.36)$$

где  $R(KON_i, TRAS_j)$  – расстояние между  $i$ -й конструкцией и  $j$ -м трубопроводом;  $R_k$  – допустимое расстояние между трубопроводом и конструкцией.

Геометрической разности высот должно быть достаточно при данной конфигурации трубопровода для обеспечения самотека.

При этом должны соблюдаться временные пределы на транспортировку вещества. Тогда

$$\Delta Z \geq \sum h = h_1 + h_2 = \lambda \frac{L\omega^2}{2dg} + \sum \xi \frac{\omega^2}{2g}, \quad (5.37)$$

где  $\Delta Z$  – геометрическая разность высот;  $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  – длина трубопровода, м;  $d$  – диаметр трубопровода, м;  $\omega$  – скорость течения жидкости в трубопроводе, м/с;  $\xi$  – коэффициент потерь напора от местных сопротивлений.

Трассы не должны пересекаться друг с другом:

$$TRASS_i \cap TRASS_j = \emptyset, \quad i=1, \dots, NF, \quad j=1, \dots, NF. \quad (5.38)$$

Трассы не должны пересекаться с аппаратами:

$$TRASS_i \cap APP_m = \emptyset, \quad i=1, \dots, NF, \quad m=1, \dots, NA. \quad (5.39)$$

Трассы не должны пересекаться со строительными конструкциями:

$$TRASS_i \cap KON_k = \emptyset, \quad i=1, \dots, NF, \quad k=1, \dots, NK. \quad (5.40)$$

Трассы не должны проходить в зонах обслуживания оборудования:

$$TRASS_i \cap ZZ_c = \emptyset, \quad i=1, \dots, NF, \quad c=1, \dots, NZ. \quad (5.41)$$

Исходя из всего изложенного, можно сформулировать задачу трассировки технологических трубопроводов следующим образом: найти такой вариант трассировки трубопроводов ( $xnt_{ji}, ynt_{ji}, znt_{ji}, xkt_{ji}, ykt_{ji}, zkt_{ji}$ )  $i=1, \dots, NF, j=1, \dots, NT$ , при котором выполняются условия (5.31) – (5.41) и критерий (5.19) достигает минимума.

## 5.2.2. ПРОЦЕДУРНАЯ МОДЕЛЬ ТРАССИРОВКИ ТРУБОПРОВОДОВ

Система транспортировки материальных потоков в ХТС состоит из двух основных типов трубопроводов: простого (соединяющего только два аппарата) и разветвленного (соединяющего более двух аппаратов). Таким образом, процедура трассировки ТТ должна работать как с простыми, так и с разветвленными трубопроводами.

Так как критерий оптимальности зависит от пространственного варианта трассировки трубопроводов, т.е. от длины и количества поворотов, то на этапе проведения трасс будем искать вариант трассы с наименьшими этими показателями.

Процедурная модель трассировки ТТ позволяет проводить как разветвленные, так и простые трубопроводы, с нахождением минимальных показателей длины и количества поворотов. Вначале проводится «простая» трасса, а потом ее усложне-

ние. Под «простой» трассой будем понимать самую рациональную трассу, т.е. с наименьшей длиной и минимальным количеством поворотов. В нашем случае самой рациональной трассой будет трасса, состоящая максимум из трех фрагментов, каждый фрагмент параллелен одной из осей  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ . Можно получить 6 вариантов проведения такой трассы. Если одна из этих трасс удовлетворяет всем условиям, то лучше мы уже не найдем. Для каждой такой трассы просчитываются коэффициенты:  $K_p$ , который равен числу пересечений трассы с другими объектами, если равен 0, то трасса считается проведенной; коэффициент рациональности  $K_r$ , равный произведению длины на количество поворотов трассы, чем меньше это значение, тем лучше.

Получение простой трассы происходит следующим образом: определяем вектор направления, соединяющий начальную и конечную точки, потом вектор раскладывается по трем составляющим, параллельным осям координат. Получаем 6 вариантов разложения или 6 простых трасс.

В случае канальной трассировки определяется маршрут: источник – канал, прохождение в канале, канал – приемник. В этом случае получаем несколько векторов направлений, процесс разложения на составляющие происходит для каждого из векторов.

Для разветвленного трубопровода вектор направления строится не до источника, а до ближайшей точки уже проведенной трассы, если таковой нет, то строится вектор направления до ближайшего приемника группы, которой принадлежит эта трасса. Обход препятствий осуществляется посредством обхода параллелепипеда с одной из четырех сторон.

Процедура трассировки неразветвленных трубопроводов включает в себя следующие шаги: определение расположения области трассировки в виде каналов; определение порядка проведения трасс трубопроводов; непосредственное решение задачи трассировки трубопроводов; оптимизация проведенных трасс.

Вначале определяется пространственное расположение каналов (определяется высота, на которой будут располагаться каналы и их размеры). Затем определяется порядок прокладки трасс трубопроводов. Для количественной оценки очередности трассировки трубопроводов будем использовать эвристический коэффициент конкуренции:

$$R_k = aK_i + bB_i + cD_i, \quad (5.42)$$

где  $K$  – коэффициент перекрытия каждой линии трубопровода;  $B$  – балл трубопровода;  $D$  – средний внешний диаметр трубопровода;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты.

Коэффициент  $K$  характеризует насыщенность пространства, в котором прокладывается  $i$ -й трубопровод, другими трубопроводами. Если  $i$ -й трубопровод трассируется в зоне прокладки многочисленных линий трубопроводов, коэффициент для него максимален, и этот трубопровод должен прокладываться раньше других.

Другой фактор, влияющий на очередность трассировки, – это группа и категория трубопровода, которые определяют условия и степень опасности их эксплуатации. Каждому трубопроводу можно поставить в соответствие оценку – балл трубопровода  $B$ . Если трубопровод опасен при эксплуатации и имеет большой балл  $B$ , то необходимо его трассировать таким образом, чтобы он был как можно короче, и имел меньшее число поворотов и обходов. Это позволит уменьшить опасность при его эксплуатации. Поэтому такие трубопроводы нужно трассировать в первую очередь.

Третий фактор, который оказывает большое влияние на очередность трассировки, – это внешний диаметр  $i$ -го трубопровода  $D$ . Прокладка трубопроводов с большим условным внешним диаметром по мере расходования ресурса каналов становится затруднительной, так как увеличивается число поворотов трассы и число обходов препятствий. Трассировка трубопроводов выполняется в порядке убывания величины коэффициента конкуренции.

Процедура трассировки соединения начинается с формирования вектора направления. Если трассировка осуществляется без каналов, то вектор с координатами начала – штуцер аппарата источника, конец – штуцер аппарата приемника, при канальной трассировке – формируются несколько векторов направления, от штуцера аппарата источника до канала, внутри канала, от канала до штуцера аппарата приемника. Если трубопровод разветвлен, то вектор формируется до ближайшей точки разветвленной трассы, если ее еще нет, то до ближайшего аппарата, входящего в состав разветвленного трубопровода.

Вектор направления раскладывается на составляющие по осям. Получаем 6 вариантов самых простых трасс. Каждый вариант запоминается.

Берется первый вариант с наименьшим количеством пересечений с другими объектами. Вычисляем, какие объекты трасса пересекает, и обходим их. Получаем дополнительно некоторое число вариантов за счет нескольких вариантов обхода объектов. Варианты запоминаем. Повторяем до тех пор, пока количество пересечений больше 0.

Если количество пересечений с другими объектами равно 0, то трасса считается законченной. Сначала она оптимизируется (уменьшение количества поворотов), затем для нее просчитывается критерий оптимальности.

Самая первая трасса считается эталоном. Все последующие сравниваются с ней и в зависимости от значения отпадают или занимают ее место.

Процедура прекращает свою работу после перебора всех связей и оптимизации трассировки каждой из них.

## 6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР И РАЗМЕЩЕНИЕ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

В данной главе рассматриваются вопросы, связанные с детализацией проекта трубопроводных сетей [19, 20], полученного при решении задач размещения оборудования и трассировки технологических трубопроводов, как в многоэтажных производственных помещениях, так и в цехах ангарного типа.

Под термином «трубопроводная арматура» понимается устройство [3], устанавливаемое на трубопроводах, агрегатах, сосудах и предназначенное для управления (отключения, распределения, регулирования, сброса, смешивания, фазоразделения) потоками рабочих сред (жидкой, газообразной, газожидкостной, порошкообразной, суспензии и т.п.) путем изменения площади проходного сечения. Основными параметрами арматуры являются: условный проход  $D_y$  (согласно ГОСТ 28338–89) и условное давление  $P_y$  (согласно ГОСТ 26349–84).

По функциональному назначению арматуру разделяют на: запорную, регулирующую, распределительно-смесительную, предохранительную, защитную и фазоразделительную; а по конструктивным типам различают: задвижки, клапаны, краны, затворы.

В связи с большим разнообразием выпускаемых промышленностью типов промышленной трубопроводной арматуры, характеризующихся одинаковыми основными параметрами, возникает необходимость выбора такой арматуры, которая бы отвечала множеству требований  $R$ . В табл. 6.1 приведены элементы этого множества для запорной и регулирующей трубопроводной арматуры.

### 6.1. ПРОЦЕДУРНАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Ниже рассматривается процедурная модель автоматизированного выбора арматуры, характеризующейся одинаковыми основными потребительскими параметрами  $D_y$  и  $P_y$ , включающая два основных этапа.

На первом этапе выбора для заданных  $D_y^{zad}$  и  $P_y^{zad}$  формируется подмножество типов арматуры, выпускаемых промышленностью  $T^{zad} \subset T$ , где  $T$  – множество всех типов промышленной трубопроводной арматуры. Формирование  $T^{zad}$  осуществляется с использованием базы данных типов арматуры, ее фрагмент приведен в табл. 6.2.

#### 6.1. Потребительско-эксплуатационные показатели промышленной трубопроводной арматуры

№	Запорная арматура	№	Регулирующая арматура
1	Герметичность затвора (высокая)	1	Герметичность затвора (высокая)
2	Гидравлическое сопротивление (низкое)	2	Пропускная способность (высокая)
3	Масса (небольшая)	3	Масса (небольшая)
4	Строительная длина (небольшая)	4	Строительная длина (небольшая)
5	Герметичность к внешней среде (высокая)	5	Герметичность к внешней среде (высокая)
6	Частое срабатывание (открывание – закрывание)	6	Частое срабатывание (открывание – закрывание)
7	Двухпозиционное регулирование	7	Двухпозиционное регулирование
8	Дросселирование	8	Аналоговое регулирование
9	Регулирование	9	Суженный проход
10	Суженный проход	10	Равнопроходность арматуры и трубопровода
11	Равнопроходность арматуры и трубопровода	11	Быстродействие (скорость выполнения команды): пневматическое электрическое гидравлическое
12	Быстродействие (небольшое число оборотов)		
13	Высокое давление		
14	Вакуум		
15	Перекрытие потока при высоком перепаде давления	12	Высокое давление
16	Перекрытие потока при низком перепаде давления	13	Перекрытие потока при высоком перепаде давления:
17	Малошумность		пневматическое с мем-

			бранно-исполнительными механизмами
18	Кавитация и мгновенное парообразование		пневматическое поршневое
19	Пульпа		электрическое
20	Абразивные шламы		гидравлическое
21	Коррозионные среды	14	Малошумность
22	Высокие температуры	15	Кавитация и мгновенное парообразование
23	Низкие температуры	16	Пульпа
24	Приводное усилие (небольшое)	17	Абразивные шламы
25	Ремонтопригодность	18	Коррозионные среды
26	Стоимость установки (низкая)	19	Высокие температуры
27	Стоимость обслуживания (низкая)	20	Низкие температуры
		21	Приводное усилие (небольшое)
		22	Ремонтопригодность
		23	Стоимость установки (низкая)
		24	Стоимость обслуживания (низкая)

**6.2. Фрагмент базы данных типов арматуры, выпускаемой промышленностью**

Условный проход $D_y$	Условное давление $P_y$	Типы арматуры
...	...	...
15	10	Краны
		Клапаны
		Предохранительные клапаны
		Регулирующие клапаны
		Задвижки
15	16	Краны
		Клапаны
		Обратные клапаны
		Предохранительные клапаны
		Регулирующие клапаны
		Конденсатоотводчики
...	...	...
200	64	Краны
		Клапаны
		Обратные клапаны
		Регулирующие клапаны
		Задвижки
200	80	Краны
...	...	...
1000	25	Обратные затворы
		Регулирующие клапаны

		Задвижки
		Затворы
1000	64	Задвижки
...	...	...
2400	2.5	Затворы

На втором этапе выбора арматуры среди подмножества типов  $T^{\text{zad}}$  нужно выбрать такой тип, который бы удовлетворял некоторому подмножеству потребительских требований (показателей)  $R^{\text{zad}} \subset R$ .

Вследствие большого количества критериев оценки, используемых при выборе арматуры, решение рассматриваемой задачи на основании математических критериев оптимальности до настоящего момента практически не проводилось.

### 6.1.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Математически задачу выбора арматуры можно сформулировать следующим образом:

для заданного функционального назначения, основных потребительских параметров  $D_y^{\text{zad}}$ ,  $P_y^{\text{zad}}$  и эксплуатационных показателей  $R^{\text{zad}} \subset R$  найти такой тип арматуры, для которого справедливо следующее:

$$t_{\text{opt}} = \arg \min_{t \in T^{\text{zad}}} F(t), \quad (6.1)$$

при условии, что с позиций используемых эксплуатационных показателей (см. табл. 6.1) применение  $t$ -го типа арматуры возможно:

$$o_r(t) \neq 0, \quad r \in R^{\text{zad}}, \quad t \in T^{\text{zad}}, \quad (6.2)$$

где  $o_r(t)$  – количественная оценка  $r$ -го показателя для  $t$ -го типа арматуры.

Наиболее прогрессивным методом решения этой задачи, по нашему мнению, является применение экспертных систем.

### 6.1.2. ПРОЦЕДУРА ВЫБОРА ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

В связи с тем, что рассматриваемая задача относится к классу многокритериальных задач, необходимо решить вопрос о выборе методов нормализации множества критериев и их ранжирования; а также метода многокритериального выбора [1, 35, 48]. В данной работе критерий оптимальности  $F(t)$  представляет собой сумму взвешенных относительных потерь критериев: стоимости арматуры с учетом привода и некоторого подмножества потребительских требований  $R^{\text{zad}} \subset R$ , задаваемого лицом, принимающим решение (ЛПР).

В этом случае критерий  $F$  можно записать как

$$F(t) = \sum_{i=1}^{R^{\text{zad}}+1} \rho_i \omega_i(t), \quad (6.3)$$

где  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i, \dots, \rho_{R^{\text{zad}}+1}$  – весовые коэффициенты.

$$\rho = \{\rho_i\} = \{\rho_i : \rho_i > 0, \quad i = 1, \dots, R^{\text{zad}} + 1, \quad \sum_{i=1}^{R^{\text{zad}}+1} \rho_i = 1\}, \quad (6.4)$$

где  $\rho_i \omega_i(t)$  – взвешенные потери по  $i$ -му критерию;  $\omega_i(t) = \omega_i(F_i(t))$ ,  $i = 1, \dots, R^{\text{zad}} + 1$ ,  $t \in T^{\text{zad}}$  – монотонные функции, преобразующие каждую функцию цели  $F_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, R^{\text{zad}}$ ,  $t \in T^{\text{zad}}$  к безразмерному виду;  $F_1(t)$  – экономический критерий, включающий в себя стоимость арматуры с учетом привода;  $F_i(t)$ ,  $i = 2, R^{\text{zad}} + 1$  – оценка потребительско-эксплуатационных показателей. Причем для функции цели  $F_1(t)$  находится минимум, а для остальных – максимум.

$$\omega_1(t) = \frac{F_1(t) - F_{10}}{F_{1\max} - F_{10}}, \quad t \in T^{\text{zad}}; \quad (6.5)$$

$$\omega_i(t) = \frac{F_{i0} - F_i(t)}{F_{i0} - F_{i\min}}, \quad t \in T^{\text{zad}}, \quad i = 2, R^{\text{zad}} + 1, \quad (6.6)$$

где  $F_{1\max}$  – наибольшее значение минимизируемой функции  $F_1(t)$ ,  $t \in T^{\text{zad}}$  на множестве допустимых альтернатив  $T^{\text{zad}}$ ;  $F_{i\min}$ ,  $i = 2, R^{\text{zad}} + 1$  – наименьшее значение максимизируемых функций  $F_i(t)$ ,  $t \in T^{\text{zad}}$  на множестве допустимых альтерна-

тив  $T^{\text{zad}}$ ,  $F_{i0}$ ,  $i = 1, R^{\text{zad}} + 1$  – оптимальные значения функций цели. Значения  $\omega_i(t)$ ,  $i = 1, R^{\text{zad}} + 1$ ,  $t \in T^{\text{zad}}$  лежат в пределах от 0 до 1.

Как и при решении других многокритериальных задач, в данном случае необходимо найти такую компромиссную альтернативу  $t \in T^{\text{zad}}$ , которая может не являться оптимальной ни для одной функции цели  $F_i(t)$ , но оказываться приемлемой для интегрального критерия  $F(t)$ . Компромиссное решение в классическом варианте предполагает равенство минимально возможных взвешенных потерь  $\rho_i \omega_i(t) = k_{0\min}$ ,  $i = 1, R^{\text{zad}} + 1$ . Так как в данной работе при поиске оптимального решения используется метод полного перебора, то достижение равенства взвешенных потерь  $\rho_i \omega_i(t)$  является необязательным. Для выбора единственного решения в задаче принятия сложного решения требуется задать весовые коэффициенты  $\rho_i$ ,  $i = 1, R^{\text{zad}} + 1$ , удовлетворяющие соотношению (6.3) и отражающие относительную важность всех функций цели. Наиболее эффективными подходами к определению этого предпочтения являются методы ранжирования и приписывания баллов [35] (последний применен в данной работе).

Для определения количественных оценок потребительско-эксплуатационных показателей арматуры предложено оценивать каждый показатель по пятибалльной системе в соответствии с его значимостью для конкретного типа арматуры. Эти оценки приведены в табл. 6.3.

В соответствии с принятой шкалой оценок показателей различных типов на основе данных о сравнительной их применимости [3] все типы арматуры, выпускаемые промышленностью, были оценены по каждому показателю. В табл. 6.4 приведен фрагмент базы данных оценок потребительско-эксплуатационных показателей для отдельных типов арматуры.

### 6.3. Оценки потребительско-эксплуатационных показателей типов арматуры

№ п/п	Оценка показателя	Значение показателя по пятибалльной системе
1	Применение предпочтительно	5
2	Применение рекомендуется	4
3	Применение допустимо	3
4	Применение не рекомендуется	2
5	Требуется применение специальных конструктивных исполнений	1
6	Применение не допускается	0

### 6.4. Фрагмент базы данных оценок потребительско-эксплуатационных показателей типов арматуры

Наименование показателя	Назначение арматуры	Тип арматуры	Оценка показателя- $\omega_i$
...	...	...	...
Герметичность затвора (высокая)	Запорная	Задвижки с выдвигным шпинделем шиберные	4
		Задвижки с невыдвигным шпинделем шланговые	5
		Клапаны запорные сальниковые с наружной резьбой проходные	5
		Клапаны обратные поверхностные	2
		...	...
...	Регулирующая	Клапаны отсечные проходные	4
		Задвижки шланговые	5
		Клапаны регулирующие сальниковые поворотные	2
...	...	...	...
Масса (небольшая)	Запорная	Задвижки с выдвигным шпинделем клиновые двухдисковые	0
Масса (небольшая)	Запорная	Задвижки с выдвигным шпинделем шиберные	3
		Клапаны запорные бессальниковые диафрагмо-	4

		вые	
		Клапаны обратные безударные	5
		...	...
	Регулирующая	Клапаны регулирующие сальниковые поворотные	5
		Клапаны регулирующие бессальниковые сильфонные трехходовые	2
...	...	...	...
Высокое давление	Запорная	Клапаны запорные сальниковые с внутренней резьбой угловые	5
		Клапаны запорные сальниковые с внутренней резьбой прямооточные	2
		Краны пробковые конические сальниковые с подъемом пробки	0
		Краны шаровые проходные	4
		Клапаны обратные подъемные	4
		...	...
	Регулирующая	Клапаны отсечные сальниковые угловые	4
		Клапаны отсечные сальниковые прямооточные	2
		Задвижки шланговые	0
		Клапаны регулирующие бессальниковые сильфонные трехходовые	0
...	...	...	...

Процедура решения задачи (6.1) – (6.6) сводится к формированию множества типов арматуры заданного функционального назначения, отвечающих основным потребительским параметрам  $D_y^{\text{zad}}$ ,  $P_y^{\text{zad}}$  и эксплуатационным показателям  $R^{\text{zad}} \subset R$ , для которых выполняется условие (6.2). Далее, используя метод полного перебора, выбирается такой тип  $t_{\text{opt}}$ , для которого величина критерия  $F(t)$  имеет минимальное значение.

Проиллюстрируем методику автоматизированного выбора трубопроводной арматуры на следующем примере. При транспортировке продуктов из одного аппарата в другой необходимо установить запорную арматуру на трубопровод следующих параметров  $D_y^{\text{zad}} = 200$  мм и  $P_y^{\text{zad}} = 6$  кгс/см<sup>2</sup>. При выборе следует учитывать следующие потребительские показатели: высокую герметичность затвора, низкое гидравлическое сопротивление, небольшое приводное усилие.

На первом этапе выбора определяем множество типов арматуры, выпускаемых промышленностью с параметрами  $D_y^{\text{zad}} = 200$  мм и  $P_y^{\text{zad}} = 6$  кгс/см<sup>2</sup>. Это: краны, клапаны, предохранительные клапаны и задвижки.

Для каждого из используемых критериев: высокая герметичность затвора, низкое гидравлическое сопротивление, небольшое приводное усилие зададим равные веса  $\rho_i = 0,33$ ,  $i = 1, 3$ . Далее формируем множество типов арматуры, которые могут быть использованы в данном трубопроводе. В конечном итоге оптимальным с позиций принятых критериев оказался: Кран шаровой запорный фланцевый ВНИЛ 491825.

## 6.2. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗМЕЩЕНИЯ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Вариант размещения трубопроводной арматуры на технологических трубопроводах зависит от ряда факторов, основными из которых являются: характеристики размещаемой арматуры (тип, назначение, условный диаметр, материал, длина и высота, тип привода); сведения из технических паспортов о требованиях к установке арматуры на трубопроводе; разнообразные ведомственные инструкции, правила по технике безопасности, ремонту и обслуживанию арматуры, а также конструкционные и технологические ограничения, невыполнение которых может привести к проблемам по установке, ремонту, замене арматуры или к ее неправильной работе.

Приведенные ниже ограничения математической модели [20] разработаны на основе перечисленных выше требований.

**Ограничение 1.** Ориентация расположения арматуры на трубопроводе:

– Арматура устанавливается на вертикальном участке трубопровода

$$(xar_{kj} = xnt_{ff} = xkt_{ff}) \vee (yar_{kj} = ynt_{ff} = ykt_{ff}),$$

$$AR_{kj} \in AR : \theta_{kj} = 90^\circ. \quad (6.7)$$

– Арматура устанавливается на горизонтальном участке трубопроводе

$$((zar_{kj} = znt_{ff} = zkt_{ff}) \wedge (xar_{kj} = xnt_{ff} = xkt_{ff})) \vee$$

$$\vee ((zar_{kj} = znt_{ff} = zkt_{ff}) \vee (yar_{kj} = ynt_{ff} = ykt_{ff})),$$

$$AR_{kj} \in AR : \theta = 0^\circ, \text{ где } k = 1, \dots, NAR_j, f = 1, \dots, NF, j = 1, \dots, NT. \quad (6.8)$$

**Ограничение 2.** Минимальное расстояние между трубопроводной арматурой, установленной на разных трассах, должно быть не менее допустимого.

Тогда должно выполняться неравенство:

$$\rho(AR_{k'j'}, AR_{k''j''}) \geq [R_{AR\_AR}], \quad (6.9)$$

где  $\rho(AR_{k'j'}, AR_{k''j''})$  – расстояние между арматурами, принадлежащими разным трассам;  $[R_{AR\_AR}]$  – допустимое расстояние между трубопроводной арматурой;  $k' = 1, \dots, NAR_{j'}$ ;  $k'' = 1, \dots, NAR_{j''}$ ;  $j' \neq j''$ ,  $j'' = 1, \dots, NT$ .

**Ограничение 3.** Минимальное расстояние между трубопроводной арматурой и аппаратами должно быть не менее допустимого:

$$\rho(AP_p, AR_{kj}) \geq [R_{AP\_AR}], \quad (6.10)$$

где  $\rho(AP_p, AR_{kj})$  – расстояние между аппаратом и арматурой;  $[R_{AP\_AR}]$  – допустимое расстояние между трубопроводной арматурой и аппаратом;  $P = 1, \dots, NA$ ,  $j = 1, \dots, NT$ ,  $k = 1, \dots, NAR_j$ .

**Ограничение 4.** Минимальное расстояние между трубопроводной арматурой и строительными конструкциями:

$$\rho(KON_t, AR_{kj}) \geq [R_{KON\_AR}], \quad (6.11)$$

где  $\rho(KON_t, AR_{kj})$  – расстояние между строительной конструкцией и арматурой;  $[R_{KON\_AR}]$  – допустимое расстояние между трубопроводной арматурой и строительными конструкциями;  $t = 1, \dots, NK$ ,  $j = 1, \dots, NT$ ,  $k = 1, \dots, NAR_j$ .

Следующие условия учитывают непересечение объектов между собой. Рассмотрим их формализованную запись на примере непересечения двух параллелепипедов.

Пусть  $i$  и  $j$  – два объекта, аппроксимированные параллелепипедами с центром в точках  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $(x_j, y_j, z_j)$  и сторонами  $(a_i, b_i, c_i)$ ,  $(a_j, b_j, c_j)$ .

Тогда условие их непересечения можно записать в виде следующих неравенств:

$$\left(x_i + \frac{a_i}{2}\right) < \left(x_j - \frac{a_j}{2}\right) \vee \left(x_i - \frac{a_i}{2}\right) > \left(x_j + \frac{a_j}{2}\right) \vee \left(y_i + \frac{b_i}{2}\right) < \left(y_j - \frac{b_j}{2}\right) \vee$$

$$\vee \left(y_i - \frac{b_i}{2}\right) > \left(y_j + \frac{b_j}{2}\right) \vee \left(z_i + \frac{c_i}{2}\right) < \left(z_j - \frac{c_j}{2}\right) \vee \left(z_i - \frac{c_i}{2}\right) > \left(z_j + \frac{c_j}{2}\right).$$

Более коротко это условие можно записать так:  $v_i \cap v_j = \emptyset$ , где  $v_i$  и  $v_j$  – объем объектов  $i$  и  $j$ .

**Ограничение 5.** Непересечение трубопроводной арматуры с аппаратами:

$$vAR_{kj} \cap vAP_p = \emptyset,$$

$$\text{где } \forall k = 1, \dots, NAR_j; j = 1, \dots, NT; p = 1, \dots, NA. \quad (6.12)$$

**Ограничение 6.** Непересечение трубопроводной арматуры со строительными конструкциями:

$$vAR_{kj} \cap vKON_t = \emptyset,$$

$$\text{где } \forall k = 1, \dots, NAR_j; j = 1, \dots, NT; t = 1, \dots, KON. \quad (6.13)$$

**Ограничение 7.** Непересечение трубопроводной арматуры друг с другом:

$$vAR_{k'j'} \cap vAR_{k''j''} = \emptyset,$$

$$\text{где } k' = 1, \dots, NAR_{j'}; k'' = 1, \dots, NAR_{j''}; j', j'' = 1, \dots, NT, j' \neq j''. \quad (6.14)$$

**Ограничение 8.** Для удобства обслуживания расстояние до ручного привода трубопроводной арматуры от уровня пола помещения или площадки, с которой производят обслуживание, должно быть не более регламентированного нормативно-технической документацией (рис. 6.1).

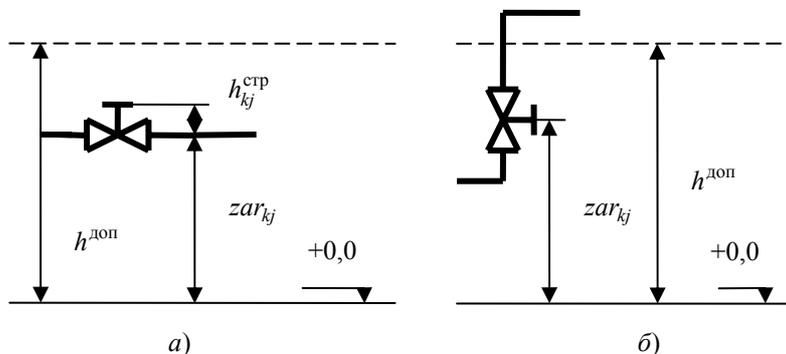
$$\begin{cases} zar_{kj} \leq h^{\text{доп}} & \text{при } \theta = 90^\circ; \\ h_{kj}^{\text{стр}} + zar_{kj} \leq h^{\text{доп}} & \text{при } \theta = 0^\circ, \end{cases} \quad (6.15)$$

где  $zar_{kj}$  – высота от пола или площадки обслуживания до трубопроводной арматуры;  $h^{доп}$  – максимально допустимая высота от уровня пола (площадки обслуживания) до маховика трубопроводной арматуры;  $h_{kj}^{стр}$  – строительная высота  $k$ -й арматуры.

**Ограничение 9.** Соответствие диаметров штуцера аппарата и трубопроводной арматуры:

$$\rho(AP_p; AR_{kj}) - \frac{1}{2}l_{kj}^{стр} \geq l^{доп} \forall d_p^i > d_{kj}. \quad (6.16)$$

Это условие показывает, что если диаметры штуцера аппарата больше диаметра трубопровода, то между арматурой и штуцером устанавливается переходное устройство.



**Рис. 6.1. Установка арматуры:**

$a$  – на вертикальном участке ( $Q = 90^\circ$ );  $b$  – на горизонтальном участке ( $Q = 0^\circ$ )

**Ограничение 10.** Соответствие условных диаметров арматуры и диаметра трубопровода:

$$d_{fj} = d_{kj} \forall f = 1, \dots, NF, \quad k = 1, \dots, NAR, \quad j = 1, \dots, NT. \quad (6.17)$$

### 6.2.1. КРИТЕРИЙ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Размещение трубопроводной арматуры оценивается рядом величин, таких как удобство обслуживания, надежность, экономичность, ремонтпригодность и т.д. Так как критерии надежности и ремонтпригодности использовались в задаче выбора трубопроводной арматуры, то в задаче размещения целесообразно использовать аддитивный критерий, включающий следующие составляющие:

- $S_1$  – месторасположение арматуры на трассе;
- $S_2$  – удобство обслуживания;
- $S_3$  – дополнительные затраты на возведение площадки для обслуживания арматуры;
- $S_4$  – расстояние от арматуры до аппарата источника (приемника).

Первая составляющая критерия характеризует положение арматуры на трассе трубопровода. Оценивается в баллах и имеет вид:

$$S_1 = \begin{cases} 0 & \text{– трубопроводная арматура расположена в зоне} \\ & \text{обслужив(приемника)га источника (пприемник);} \\ 1 & \text{– вне зоны.} \end{cases}$$

Для вычисления этой составляющей критерия достаточно проверить условие  $\cup AR_{kj} \cap \cup AP_j^{обс} = \emptyset$  нахождения арматуры в зоне обслуживания аппарата.

Вторая составляющая критерия оценивает удобство обслуживания арматуры с точки зрения возможности ее обслуживания с нулевой отметки пола или с уже имеющейся площадки обслуживания:

$$S_2 = \begin{cases} 0 & \text{– обслуживание ведется с пола;} \\ 1 & \text{– обслуживание ведется с площадки.} \end{cases}$$

Третья составляющая критерия оценивает затраты на проведение дополнительных мероприятий по созданию условий для обслуживания арматуры, если таковые требуются:

$$S_3 = \begin{cases} 0, & \text{если } zar_{kj} + h_{kj}^{стр} \leq h^{доп} \text{ – арматуру можно обслужить с пола;} \\ c_1 h_{пл} = c_1 (zar_{kj} - h^{доп}), & \text{если } zar_{kj} > h^{доп} \text{ –} \\ & \text{возводится дополнительная площадка обслуживания;} \\ c_{2j} 2 (zar_{kj} - h^{доп}) & \text{трассы, гся конфигурация трасс,} \end{cases}$$

где  $h^{доп}$  – допустимая высота расположения арматуры от пола (без площадки обслуживания);  $c_1$  – усредненные затраты на возведение площадки обслуживания высотой 1 м (р./м);  $c_{2j}$  – стоимость 1 м  $j$ -го трубопровода.

Последняя составляющая критерия  $S_3$  оценивает затраты, связанные с изменением конфигурации трассы (если это возможно) для изменения высоты ее прохождения в точке установки арматуры до  $h^{доп}$  (рис. 6.2).

Четвертая составляющая критерия вычисляет расстояние от аппарата источника (приемника) до места установки арматуры:

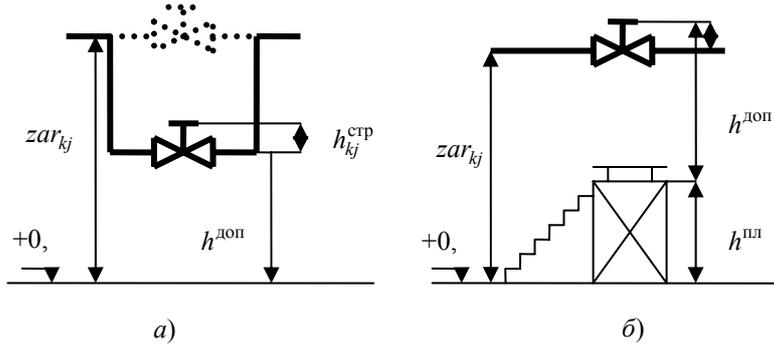
$$S_4 = \rho(AP_j, AR_{kj}) = |xnt_{1j} - xar_{kj}| + |ynt_{1j} - yar_{kj}| + |znt_{1j} - zar_{kj}|,$$

где  $xnt_{1j}$ ,  $ynt_{1j}$ ,  $znt_{1j}$  – координаты штуцера аппарата источника.

Эта составляющая рассчитывается только в том случае, если найдено несколько альтернативных вариантов расположения арматуры с одинаковым значением критерия по трем первым составляющим. Например, если в зоне обслуживания аппарата имеется участок трубопровода, на котором арматура может быть установлена и ее обслуживание ведется с пола, то очевидно, что на этом участке составляющие критерия  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  будут одинаковы. В этом случае составляющая  $S_4$  выберет позицию, ближайшую к аппарату.

Таким образом, критерий размещения арматуры имеет вид:

$$S = \sum_{i=1}^4 S_i.$$



**Рис. 6.2. Создание условий для обслуживания арматуры:**

*a* – путем изменения конфигурации трассы;  
*б* – путем возведения площадки обслуживания

Однако, использовать его в таком виде нельзя, так как составляющие критерия имеют разную размерность:  $S_1$  и  $S_2$  – баллы,  $S_3$  – рубли,  $S_4$  – метры. Поэтому, как и в задаче выбора арматуры, необходимо произвести нормализацию критерия и привести его к безразмерному виду. Для этого представим критерий в виде:

$$S(AR') = \sum_{j=1}^{NT} \sum_{k=1}^{NAR_j} \sum_{i=1}^4 \rho_i \omega_i(AR'_{kj}), \quad (6.18)$$

где  $AR'_{kj}$  – совокупность параметров, характеризующих место установки арматуры;

$$AR'_{kj} = (xar_{kj}, yar_{kj}, zar_{kj}, \theta_{kj}), \quad k = 1, \dots, NAR_j, \quad j = 1, \dots, NT;$$

$\rho_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$  – весовые коэффициенты, такие что  $\sum_{i=1}^4 \rho_i = 1$ ;

$\omega_i(AR'_{kj})$ ,  $i = 1, \dots, 4$  – монотонные функции, преобразующие каждую функцию цели  $S_i(AR'_{kj})$  к безразмерному виду:

$$\omega_i(AR'_{kj}) = \frac{S_i(AR'_{kj}) - S_{i0}}{S_{i\max} - S_{i0}}, \quad i = \overline{1, 4}; \quad AR_{kj} \in TRAS_j,$$

где  $S_{i0}$ ,  $i = \overline{1, 4}$  – оптимальное значение функции цели;  $S_{i\max}$ ,  $i = 1, \dots, 4$  – наибольшее значение минимизируемых функций.

Таким образом, значения  $\omega_i(AR'_{kj})$ ,  $i = 1, \dots, 4$  лежат в пределах от 0 до 1.

Исходя из изложенного, задачу размещения трубопроводной арматуры можно сформулировать следующим образом: найти координаты размещения

$$AR' = \{AR'_{kj} = (xar_{kj}, yar_{kj}, zar_{kj}, \theta_{kj}), \quad k = 1, \dots, NAR_j, \quad j = 1, \dots, NT\}$$

всей арматуры, так чтобы были выполнены ограничения (6.7) – (6.16) и критерий (6.17) достигал минимума.

## 6.2.2. ПРОЦЕДУРА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ АРМАТУРЫ

Завершающим этапом решения задачи компоновки является размещение трубопроводной арматуры. При решении этой задачи должны соблюдаться условия обслуживания арматуры, доступа для ручного регулирования. При решении задачи

размещения трубопроводной арматуры конфигурация трубопроводов известна. Необходимо найти оптимальное расположение арматуры на участке трубопровода, к которому она привязана по технологической схеме. Схема разбиения участка трубопровода для перебора вариантов размещения арматуры представлена на рис. 6.3.

Алгоритм заключается в следующем:

- Выбирается шаг  $dh$ , с которым будет осуществляться изменение расчетных координат размещаемой арматуры.
- Перебираются возможные варианты расположения арматуры на определенном участке трубопровода
- Осуществляется проверка ограничений по высоте расположения от площадок обслуживания размещаемой арматуры
- Из всех вариантов, удовлетворяющих ограничениям по высоте размещения выбирается тот, при котором расстояние от размещаемой арматуры до ближайшей площадки обслуживания минимальное.

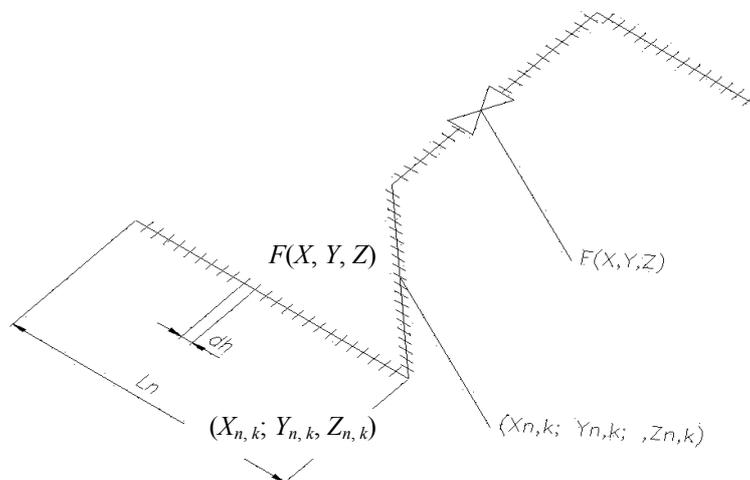


Рис. 6.3. Схема к алгоритму размещения арматуры

## 7. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ

### 7.1. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Для автоматизации процесса компоновки оборудования и решения ряда оптимизационных задач была создана автоматизированная информационная система компоновки [24, 25, 29], выполняющая следующие функции:

- выбор оборудования из базы данных (БД);
- выбор конструкции цеха (многоэтажный, ангарный);
- задание связей оборудования;
- ручное размещение оборудования;
- автоматизированное размещение оборудования;
- ручная трассировка трубопроводов;
- автоматизированная трассировка трубопроводов;
- создание пространственной модели размещенного оборудования и трубопроводов;
- автоматическое создание пространственной модели цеха и металлоконструкций;
- сохранение проекта в БД и возможность его последующего редактирования;
- добавление оборудования в БД пользователем.

#### 7.1.1. ОПИСАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ СИСТЕМЫ

На рис. 7.1 показана общая схема автоматизированной информационной системы проектирования компоновок оборудования.

При формировании объектов компоновки осуществляется выбор из базы данных аппаратов, выделение зон обслуживания и формирование системы ограничений. Структура объектов компоновки представлена на рис. 7.2.

База ограничений включает в себя набор общих и частных ограничений, условия транспортировки, диапазоны варьирования размеров цеха, связь между объектами (рис. 7.3).

Блок «Расчеты» включает в себя гидравлические расчеты для различных режимов транспортировки жидкостей; тепловые расчеты для определения величины деформаций трубопроводов от перепадов температуры и для определения тепловых потерь от поверхности трубопроводов; прочностные расчеты для определения металлоемкости конструкций (этажерок, площадок обслуживания и т.д.), а также для определения числа крепежных устройств для трубопроводов (опоры, подвески).

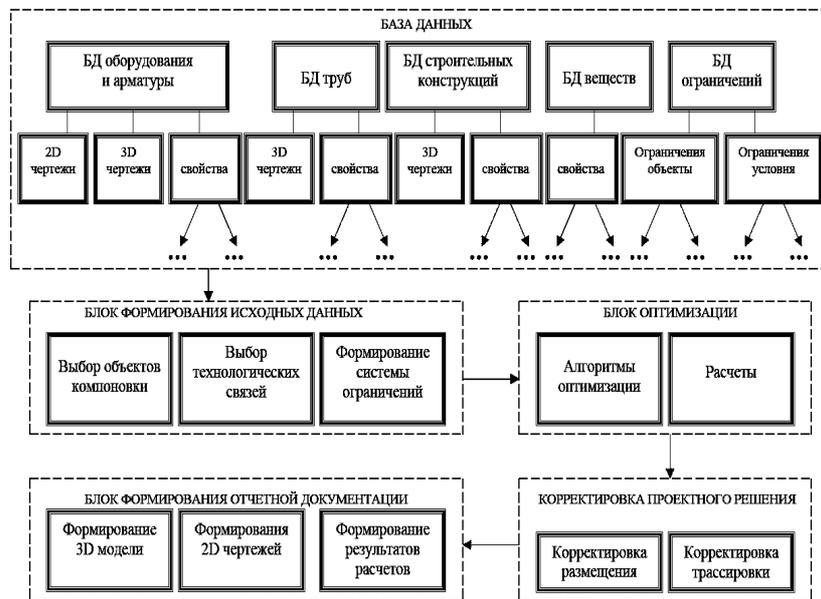


Рис. 7.1. Схема информационных потоков системы компоновки

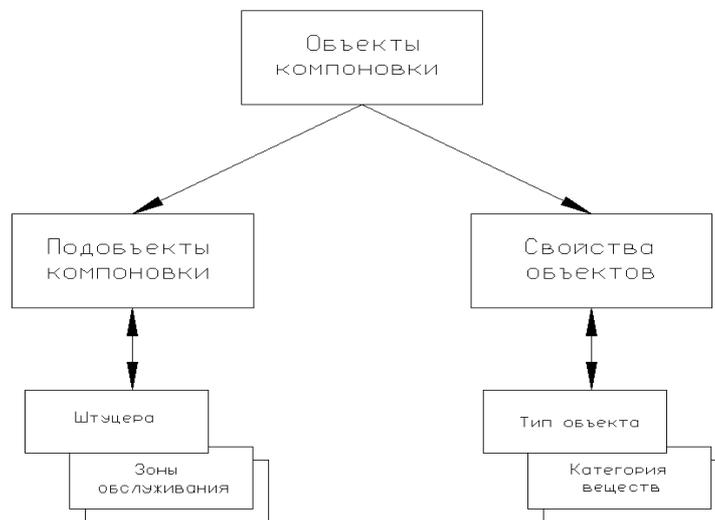


Рис. 7.2. Структура базы объектов компоновки

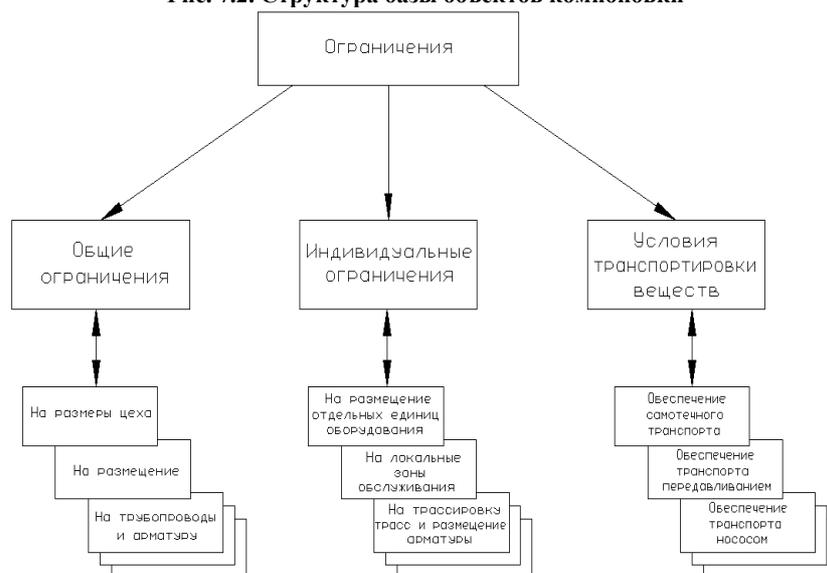


Рис. 7.3. Структура базы ограничений

Блок «Алгоритмы оптимизации» включает в себя набор оптимизационных методов и алгоритмов, применение которых согласно разработанным методикам дает возможность получить оптимальный или близкий к нему вариант проектного решения при решении задач компоновки (выбора объемно-планировочного решения цеха, размещения оборудования, трассировки трубопроводов, размещения трубопроводной арматуры, расчета оптимальных параметров ТТС).

Для реализации системы автоматизированного проектирования компоновок, обеспечивающей вышеперечисленные требования, необходимо создание базы данных, хранящей всю необходимую информацию, обеспечивающую взаимосвязь информации и простоту доступа к ней.

Базу данных можно разделить на три части: первая – база объектов компоновки, вторая – база ограничений, третья – база проектов.

База объектов компоновки представляет собой файлы двумерных и объемных чертежей оборудования, файлы описания оборудования, файлы таблиц типоразмеров оборудования и таблицы штуцеров с формулами для расчета координат штуцеров оборудования в зависимости от типоразмеров, а также содержит чертежи трубопроводной арматуры, элементов строительных конструкций и других объектов, необходимых для выполнения проекта компоновки (рис. 7.4).

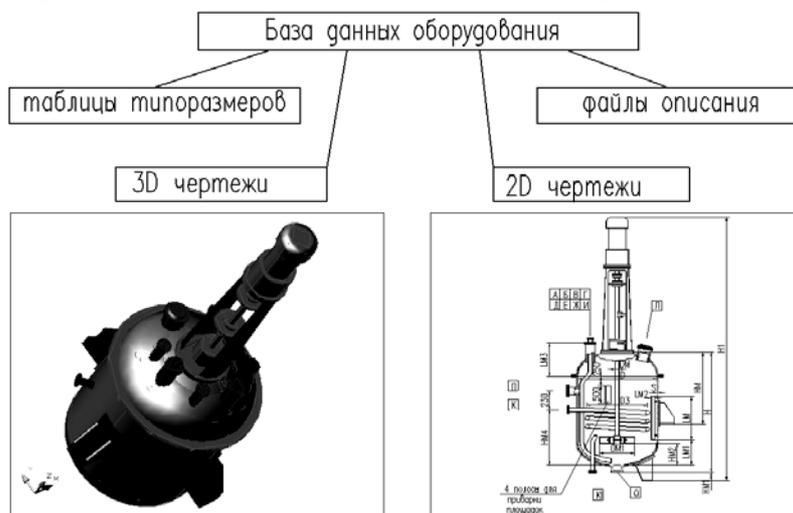


Рис. 7.4. Структура базы данных оборудования

База ограничений хранит условия взаимного размещения объектов, пределы варьирования размеров строительных конструкций, информацию о зонах, в которых нельзя размещать объекты и т.д. Структура базы ограничений обеспечивает связь между отдельными объектами и комплексами объектов.

База проектов представляет собой комплекс таблиц, связанных между собой и хранящих информацию о пользователях и их проектах. Проект представляет собой комплекс таблиц, хранящих информацию о выбранных аппаратах и их связях, ограничениях, координатах уже размещенных объектов и т.д. Также база данных хранит оборудование, созданное пользователем в виде геометрических примитивов (параллелепипед, цилиндр), габариты и штуцера которых определяет пользователь.

Для пространственной компоновки необходимо определить относительное положение в пространстве объектов компоновки и их элементов. Для каждого аппарата выбирается базовая точка, относительно которой ведутся расчеты габаритов, положения штуцеров и зон обслуживания. Габариты оборудования задаются смещениями по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  как в положительную, так и в отрицательную сторону осей, как показано на рис. 7.5 – 7.7.

Для зон обслуживания аппаратов задается сначала базовая точка и смещение относительно базовой точки оборудования, потом смещения по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  как в положительную, так и в отрицательную сторону осей.



Рис. 7.5. Определение габаритов аппарата в пространстве относительно базовой точки (в плоскости XOY).

Положения штуцеров задаются аналогично габаритам оборудования

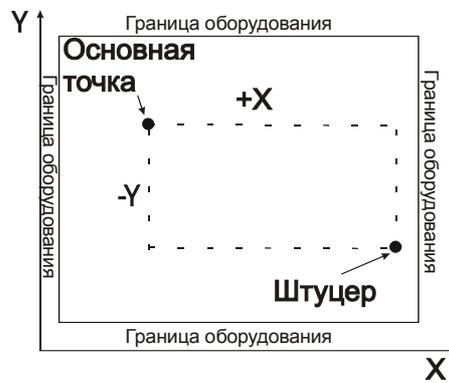


Рис. 7.6. Определение положения штуцеров аппарата в пространстве относительно базовой точки (в плоскости XOY)

База данных объектов компоновки должна хранить информацию не только об объектах компоновки, но и информацию о дополнительных объектах, таких как, например, зоны обслуживания для аппаратов. Также в базе данных хранится информация о размерах колонн, ригелей, плит перекрытий и других элементах строительных конструкций цеха.

Получение проектных решений по компоновке в системе автоматизированного проектирования начинается с формирования объектов компоновки (рис. 7.8). На этом этапе осуществляется выбор из базы данных размещаемого оборудования, при отсутствии в базе пользователь формирует необходимое ему оборудование сам в виде комплекса параллелепипедов и цилиндров.



Рис. 7.7. Определение положения зоны обслуживания аппарата в пространстве относительно базовой точки (в плоскости XOY)

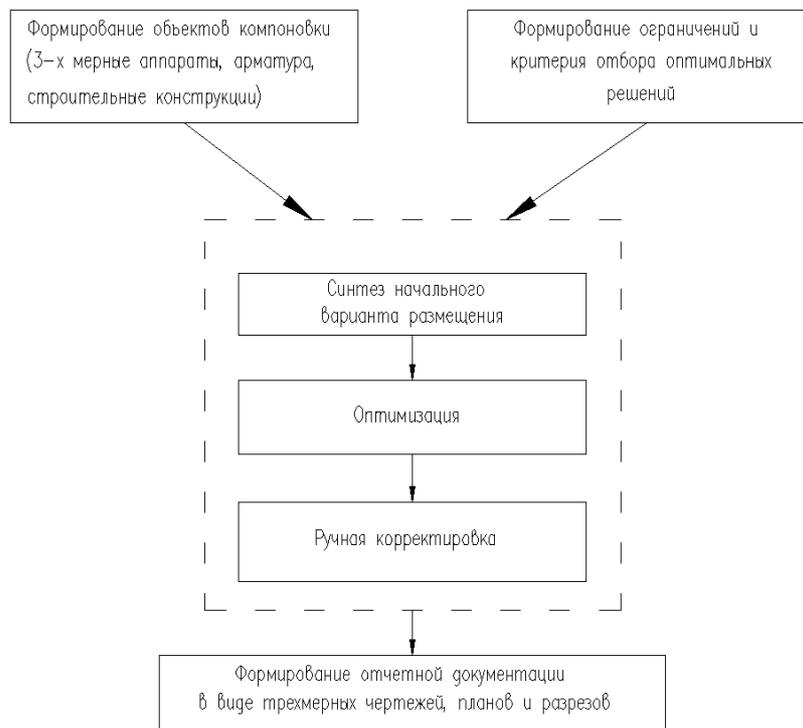


Рис.7.8. Схема проектирования в системе автоматизированной компоновки оборудования в производственных помещениях

На следующем этапе формируется система транспорта веществ между аппаратами и установками в виде простых или разветвленных трубопроводов.

Далее формируется система ограничений: на размещение отдельных единиц оборудования, ограничений, связывающих аппараты в отдельные установки, ограничений на трассировку трубопроводов и размещение трубопроводной арматуры. Таким образом, осуществляется ввод всех условий компоновки, необходимых для получения адекватного проектного решения. Далее решается комплекс задач по компоновке согласно методикам, описанным в гл. 3 – 6.

Процесс получения проектного решения компоновок начинается с выбора конструкции цеха, наиболее подходящей для компоновки в ней оборудования ХТС (согласно методике гл. 3.).

Далее для выбранной строительной конструкции решаются задачи размещения оборудования, трассировки трубопроводов, расчета ГТС.

Процесс оптимизации осуществляется в автоматизированном режиме с использованием алгоритмов, описанных в гл. 4 – 6.

Следующим этапом является ручная корректировка полученных решений. Данный этап необходим для корректировки экспертом полученных в автоматизированном режиме решений, так как не все условия, необходимые для получения адекватного проектного решения компоновки, могут быть формализованы.

Формирование отчетной документации в виде трехмерных чертежей полученных проектных решений, планов и разрезов можно получать в ручном или частично автоматизированном виде.

### 7.1.2. ОПИСАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

Информационно-графическая система автоматизированного проектирования компоновок включает в себя ряд блоков, между которыми в процессе получения проектного решения осуществляется обмен информацией. Ряд данных в процессе проектирования вносит в систему эксперт в виде исходных данных и промежуточных корректировок и ограничений. Рассмотрим подробнее информационную взаимосвязь между отдельными блоками информационно-графической системы.

Схема информационных потоков при проектировании компоновки представлена на рис. 7.9. На первом этапе – нахождения начального размещения оборудования – осуществляется расстановка аппаратов в соответствии с условиями 1 – 6 базы ограничений (рис. 7.9). Аппараты размещаются в порядке, определяемом весовыми коэффициентами. При начальной расстановке 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.

При 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 размещаемыми аппаратами. В случае, если не удастся найти варианта размещения оборудования, удовлетворяющего заданным ограничениям и исходным данным, поступает обратный сигнал к блоку начального размещения и осуществляется поиск нового варианта расстановки аппаратов. В обратном случае координаты размещенного оборудования передаются на следующий этап – определение конфигурации металлоконструкций.

При определении конфигурации металлоконструкций так же, как и в предыдущем блоке, решается оптимизационная задача. При переборе вариантов учитываются 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 проектируемой 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 (см. рис. 7.9) 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.

В случае, если невозможно осуществить трассировку с учетом всех вышеперечисленных условий, поступает обратный сигнал к задаче размещения. Если же удастся найти конфигурацию трасс удовлетворяющих всем условиям, то координаты всех отрезков трассы передаются на следующий этап размещения трубопроводной арматуры.

На этапе размещения трубопроводной арматуры осуществляется перебор возможных вариантов размещения каждой единицы арматуры. При этом используются данные о геометрии размещаемой арматуры, размеры и координаты размещения аппаратов и металлоконструкций, а также ограничения на размещение арматуры. В случае, если не удастся разместить арматуру, поступает обратный сигнал к блоку трассировки трубопроводов и осуществляется повторная трассировка той трассы, на которой не удалось разместить арматуру. Если же всю арматуру удалось разместить, то координаты аппаратов, координаты и размеры металлоконструкций, координаты всех отрезков трубопроводов и координаты размещения трубопроводной арматуры поступают в блок подготовки отчетной документации.

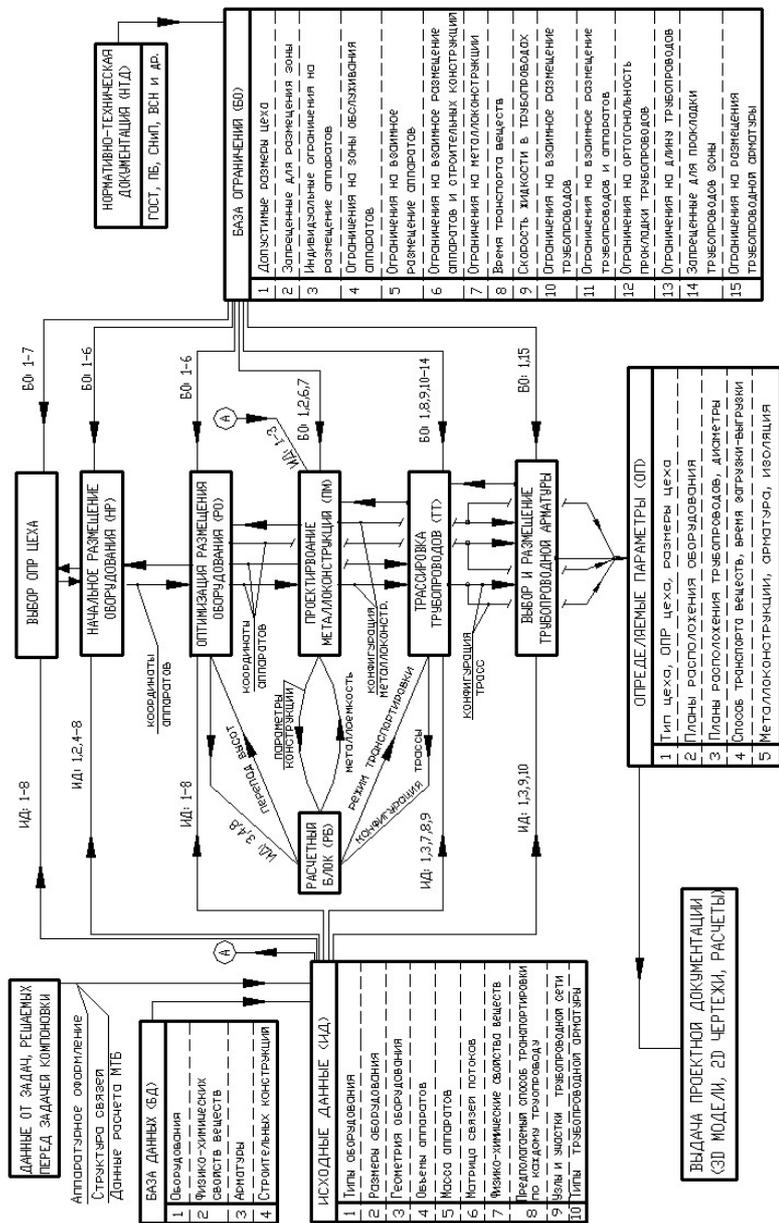


Рис. 7.9. Структура информационных потоков задачи компоновки

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

Система реализована в Borland Delphi 5.0 и имеет следующие требования к вычислительной технике и программному обеспечению:

- системная среда: Windows 9x, NT, 2000, XP;
- pentium-100; 32 Мб ОЗУ; 100 Мб свободного места на жестком диске;
- программное обеспечение: Internet Explorer 5.5; BDE 5, VoloView 2, AutoDesk Whip.

### 7.1.3. ПРИМЕРЫ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ В МНОГОЭТАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ И ЦЕХАХ АНГАРНОГО ТИПА

С помощью данной системы были получены варианты компоновок ряда производств. На рис. 7.10 представлен вариант компоновки оборудования в многоэтажном цехе, а на рис. 7.11 представлен вариант компоновки оборудования в ангарном цехе.

В табл. 7.1 дано сравнение результатов ручного рис. 7.12 и автоматизированного (рис. 7.13) проектирования компоновки оборудования на примере проектирования отделения непрерывной механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья при производстве этилового спирта. В качестве начального варианта размещения технологического оборудования были взяты проектные решения, принятые в процессе ручного проектирования компоновки данного отделения в проектном отделе ОАО «Тамбовский завод "Комсомолец" им. Н.С. Артемова».

Как видно из табл. 7.1, 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.

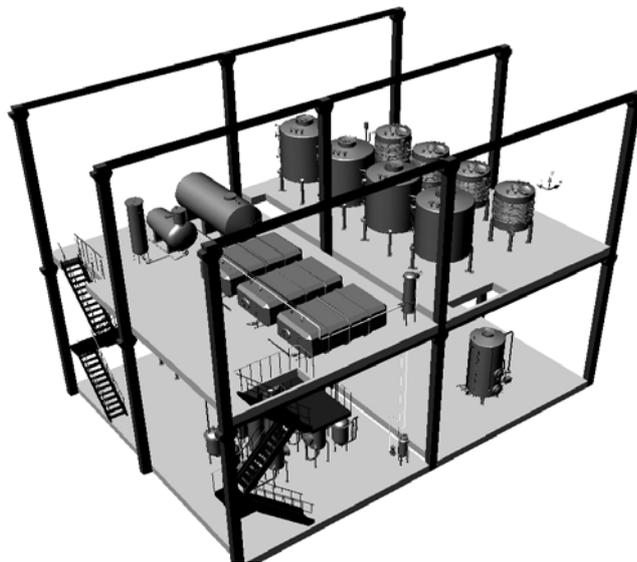


Рис. 7.10. Трехмерная модель компоновки оборудования в многоэтажном цехе

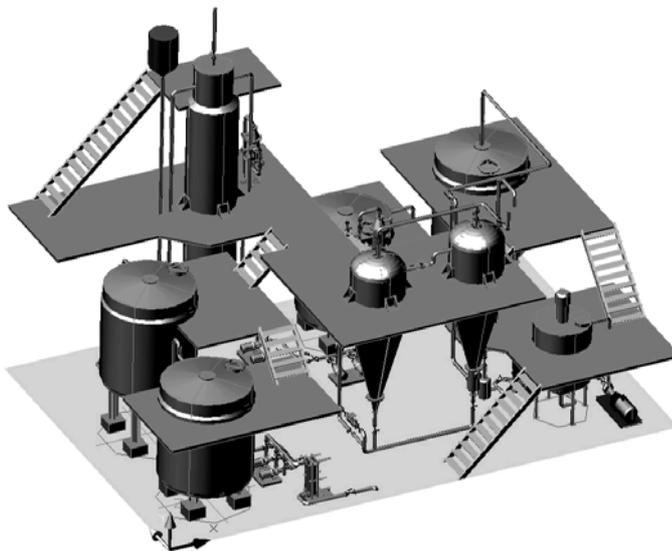
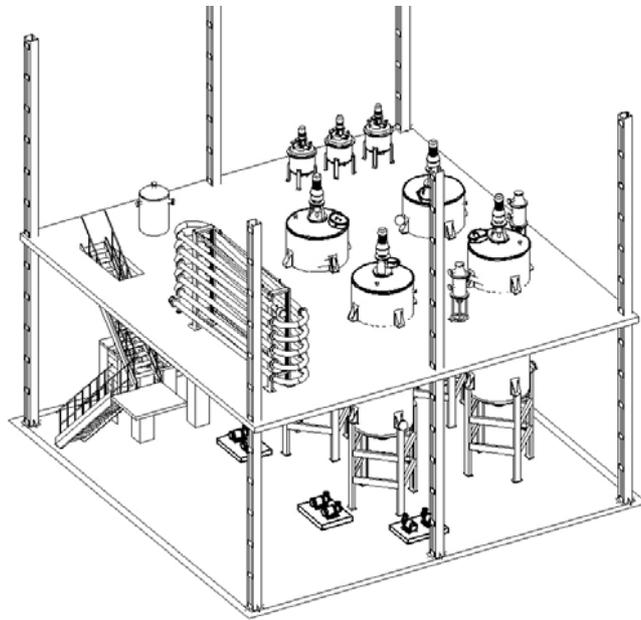


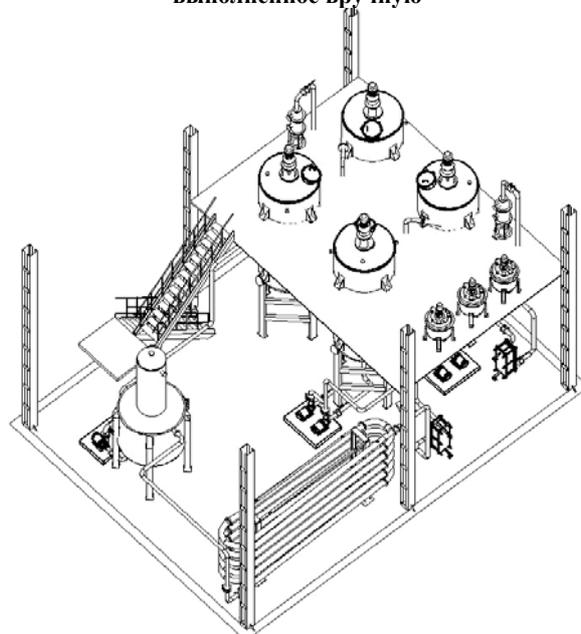
Рис. 7.11. Трехмерная модель компоновки оборудования в ангарном цехе

**7.1. Сравнительная таблица параметров проектного решения компоновки оборудования отделения механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья**

Параметр	Ручной вариант компоновки	Машинный вариант компоновки	Сравнение вариантов, %
Площадь цеха занятая оборудованием, м <sup>2</sup>	144	108	25
Длина технологических трубопроводов, м	138	109	21
Количество отводов трубопроводов, шт.	41	35	14,6
Общая площадь площадок обслуживания и этажерок, м <sup>2</sup>	144	54	62,5
Значение критерия приведенных затрат, р.	1 252 000	883 400	29,4



**Рис. 7.12. 3D размещение оборудования отделения механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья, выполненное вручную**



**Рис. 7.13. 3D размещение оборудования отделения механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья, выполненное с помощью автоматизированной информационной системы проектирования компоновок оборудования**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

---

В монографии на основе анализа процесса проектирования химических предприятий предложен подход к автоматизированному решению ряда задач, имеющих место на этапе проектирования компоновки оборудования химико-технологических схем. Были поставлены и решены следующие задачи:

- выбор объемно-планировочных решений цеха;
- размещение оборудования в многоэтажных производственных помещениях;
- трассировка трубопроводов в многоэтажных производственных помещениях;
- размещение оборудования в цехах ангарного типа;
- трассировка трубопроводов в цехах ангарного типа;
- выбор и размещение трубопроводной арматуры.

Разработаны математические постановки, аналитические и процедурные модели решения задач размещения оборудования и трассировки технологических трубопроводов в многоэтажных производственных помещениях и цехах ангарного типа.

Предложена оригинальная методика выбора трубопроводной арматуры по ряду потребительских факторов.

Разработано соответствующее математическое и алгоритмическое обеспечение системы трехмерной компоновки оборудования ТС, позволяющей решать перечисленные выше задачи с одновременной выдачей соответствующей проектной документации.

Использование системы автоматизированного проектирования компоновки оборудования позволит проектировщикам, студентам и аспирантам в более короткие сроки получать оптимальные проектные решения по соответствующим задачам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзерман, М.А. Выбор вариантов. Основы теории / М.А. Айзерман, Ф.Т. Алескеров. – М. : Наука, 1990. – 227 с.
2. Альперт, Л.З. Основы проектирования химических установок / Л.З. Альперт. – М., 1989. – 304 с.
3. Арматура-2000. Номенклатурный каталог-справочник по трубопроводной арматуре, выпускаемой в СНГ. – М. : ОАО «МосЦКБА», 2000. – 658 с.
4. Борисов, Д. Autodesk Building Systems 2004 / Д. Борисов // Журнал CADmaster. – 2004. – № 1. – С. 75 – 77.
5. Внутренние санитарно-технические устройства : справочник проектировщика в трех частях. Отопление. – М. : Стройиздат, 1990. – Ч. 1.
6. ГОСТ 12.1.007–76\*. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности : утв. Постановлением Госстандарта СССР от 10.03.1976 № 579 (ред. от 28.03.1990).
7. ГОСТ 12.1.005–88\*. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны : утв. Постановлением Госстандарта СССР от 29.09.1988 № 3388 (ред. от 01.06.2000).
8. ГОСТ 12.1.044–91. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов (ред. от 01.01.1991).
9. ГОСТ 12815–80. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на Ру от 0,1 до 20,0 МПа (от 1 до 200 кгс/см<sup>2</sup>). Типы. Присоединительные размеры и размеры уплотнительных поверхностей (ред. от 01.01.1983).
10. ГОСТ 21.101–97. СПДС. Основные требования к проектной и рабочей документации : введ. в действие Постановлением Госстроя РФ от 29.12.1997 № 18-75.
11. ГОСТ 21.109–80. Сводные спецификации трубопроводов, арматуры и деталей трубопроводов (ред. от 01.01.1981).
12. ГОСТ 23838–89. Здания предприятий. Параметры : утв. Постановлением Госстроя СССР от 11.01.1989 № 3.
13. Гринберг, Я.И. Проектирование химических производств / Я.И. Гринберг. – М., 1970. – 269 с.
14. Егоров, С.Я. Методика расчета нижней оценки стоимости соединений в задачах регулярного размещения промышленных объектов / С.Я. Егоров // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 4Б. – С. 1191 – 1199.
15. Егоров, С.Я. Методология автоматизированного поиска объемно-планировочных решений химических производств / С.Я. Егоров // Химическая промышленность сегодня. – 2006. – № 10. – С. 35 – 54.
16. 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.
17. Егоров, С.Я. Автоматизация компоновки оборудования в цехах ангарного типа. Ч. 2. Трассировка технологических трубопроводов / С.Я. Егоров, В.А. Немтинов, М.С. Громов // Химическая промышленность. – 2003. – № 8. – С. 21 – 28.
18. 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. 25 – 28.
19. Егоров, С.Я. Система автоматизированного размещения оборудования и трассировки трубопроводов в цехах ангарного типа. Ч. 4. Детализация проекта трубопроводов / С.Я. Егоров, В.А. Немтинов, А.Н. Ефименко // Химическая промышленность. – 2004. – № 3. – С. 30 – 36.
20. Егоров, С.Я. Информационная модель принятия решений по размещению трубопроводной арматуры / С.Я. Егоров, А.А. Чернега // Информационные системы и процессы. – 2006. – № 4. – С. 70 – 76.
21. Егоров, С.Я. Информационно-логическая модель компоновки промышленных объектов / С.Я. Егоров, В.А. Немтинов, М.С. Громов // Научно-техническая информация. – 2006. – Сер. 2. – № 4. – С. 19 – 23.
22. Егоров, С.Я. Математическое моделирование и оптимизация процесса компоновки оборудования химико-технологических схем при проектировании многоассортиментных химических производств : дис. ... канд. техн. наук. / С.Я. Егоров. – Тамбов : ТИХМ, 1987.
23. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 7276. Программа автоматизированного выбора трубопроводной арматуры / С.Я. Егоров, В.А. Немтинов ; Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Номер гос. рег. 50200602079 от 23 нояб. 2006 г.
24. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 7502. Программа информационной поддержки принятия решений по размещению технологического оборудования промышленных объектов / С.Я. Егоров, В.А. Немтинов, М.С. Громов ; Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Номер гос. рег. 50200700180 от 11 янв. 2007 года.
25. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 7549. Автоматизированная информационная система принятия проектных решений по компоновке промышленных объектов / С.Я. Егоров, В.А. Немтинов, М.С. Громов ; Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Номер гос. рег. 50200700133 от 18 янв. 2007 г.
26. Зайцев, И.Д. Теория и практика автоматизированного проектирования химических производств / И.Д. Зайцев. – Киев, 1981. – 307 с.
27. Кафаров, В.В. Проектирование и расчет оптимальных систем технологических трубопроводов / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М., 1991.
28. Кушко, В. Внедрение системы TechnologiCS / В. Кушко, А. Петренко // Журнал CADmaster. – 2004. – № 3. – С. 13 – 19.
29. Малыгин, Е.Н. Информационная система компоновки оборудования промышленных производств / Е.Н. Малыгин, С.Я. Егоров, М.С. Громов // Информационные системы и процессы. – 2006. – № 4. – С. 55 – 59.
30. Малыгин, Е.Н. Методика решения задачи компоновки в цехах ангарного типа / Е.Н. Малыгин, С.Я. Егоров, М.С. Громов // Химическая промышленность сегодня. – 2006. – № 6. – С. 46 – 55.
31. Малыгин, Е.Н. Постановка задачи компоновки оборудования ХТС в цехах ангарного типа / Е.Н. Малыгин, С.Я. Егоров, М.С. Громов // Химическая промышленность сегодня. – 2006. – № 7. – С. 50 – 56.
32. Мешалкин, В.П. Экспертные системы в химической технологии / В.П. Мешалкин. – М. : Химия, 1995. – 368 с.

33. Миркин, А.З. Трубопроводные системы : справочник / А.З. Миркин, В.В. Усиныш. – М., 1991.
34. Мирошкин, В. Мосэнергопроект: от кульмана к PLANT-4D / В. Мирошкин // Журнал CADmaster. – 2003. – № 3. – С. 30 – 35.
35. Михалевич, В.С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В.С. Михалевич, В.Л. Волохович. – М. : Наука, 1982. – 286 с.
36. Мухленов, В.П. Автоматизация проектирования трубопроводных систем / В.П. Мухленов. – М. : Химия, 1986. – 102 с.
37. НПБ 03-108–96. Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов : утв. постановлением Госгортехнадзора России № 11 от 02.03.1995.
38. НПБ 03-108–96. Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов. – М. : НПО ОБТ, 1997.
39. НПБ 03-75–94. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды : утв. постановлением Госгортехнадзора России № 45 от 18.07.1994.
40. НПБ 105–95. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности : введ. в действие приказом ГУГПС МВД РФ № 32 от 31.10.1995.
41. Орельяна, И. StruCAD. Конструирование и производство металлоконструкций / И. Орельяна // Журнал CADmaster. – 2002. – № 3. – С. 32 – 35.
42. Проектирование цехов химических заводов / под ред. П.Е. Устрашкина. – М., 1964.
43. СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы : утв. постановлением Госстроя СССР № 30 от 30.03.1985.
44. СНиП 21-01–97\*. Пожарная безопасность зданий и сооружений : приняты постановлением Минстроя РФ № 18-7 от 13.02.1997 (вместе с изм. № 2 от 19.07.2002).
45. СНиП 31-03–2001. Производственные здания : приняты постановлением Госстроя РФ № 20 от 19.03.2001.
46. СНиП 42-01–2002. Газоснабжение. Газораспределительные системы : приняты постановлением Госстроя РФ № 163 от 23.12.2002.
47. СНиП II-Г 14–62. Технологические стальные трубопроводы с условным давлением до 100 кг/м<sup>2</sup> включительно. Нормы проектирования.
48. Тимошук, В.С. Методы решения задач размещения и компоновки промышленных объектов при автоматизированном проектировании / В.С. Тимошук. – М. : ЦНИИ Электроника, 1978. – 68 с.
49. Трепенников, Р.И. Проектирование цехов химических заводов / Р.И. Трепенников. – М., 1984. – 200 с.
50. General mathematical programming approach for process plant layout / Michael C. Georgiadis, Gordian Schilling, Guillermo E. Rotstein, Sandro Macchietto // Computers and Chemical Engineering. – 1999. – № 23. – P. 823 – 840.
51. Ann Approach to Plant Layout Optimization / H. Schmidt-Traub, T. Holtkotter, M. Lederhose, P. Leuders // Chem. Eng. Technol. – 1999. – № 22. – P. 499 – 504.