

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ, МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОМПОНОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ АЭС

Догов А.А.

АО ИК «АСЭ» , г. Нижний-Новгород

e-mail: a.dogov@niaep.ru

В статье приводится методика моделирование компоновочных решений средствами системного анализа. Приводится описание реализованных алгоритмов компоновки оборудования, основанных на применении генетических алгоритмов, и методов кластерного анализа. Разработана математическая постановка задачи размещения оборудования, а также аналитические и процедурные модели решения таких задач. Подробно описана реализация с применением математических пакетов. Представлены примеры использования предложенного инструментария, на примере компоновке ядерного острова АЭС Определены отличительные особенности и функциональные возможности.

Ключевые слова: Проектирование генетический алгоритм, кластерный анализ

Введение

Проектирование АЭС – сложный, и одновременно трудоемкий процесс поиска оптимальных компромиссных инженерно-технических решений в условиях неполной информации, представляющий собой взаимосвязанную совокупность нескольких организационных и инженерно-технических задач. Выбор оптимальных объемно-планировочных решений по компоновке оборудования возможен традиционными ручными методами. Но 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.

Задачу об оптимальном расположении оборудования можно свести к задаче о двумерной упаковке. [] В случае двумерной упаковки требуется без взаимного наложения в ограниченной площади расположить множество различных предметов прямоугольной формы так, чтобы значение некоторой целевой функции достигало минимума.

Поскольку задача является NP-трудной, что значит, для точного решения следует перебрать все возможные комбинации, и что возможно только при небольших размерностях. Обычно для решения данного типа задач используют эвристические приближённые полиномиальные алгоритмы. Как и для других NP-трудных задач оптимизации, для решения задачи компоновки можно применить генетические алгоритмы. Они не гарантируют нахождения оптимального решения за полиномиальное время и не дают оценку близости решения к оптимальному, но обладают хорошими временными показателями, позволяя найти достаточно приемлемое решение быстрее других известных детерминированных или эвристических методов[] В качестве целевой

функции могут рассматриваться площадь занимаемого производственного помещения для размещения оборудования, суммарная длина взаимных связей между установками, стоимость монтажа и обслуживания и т. д.

Идея генетического алгоритма состоит в моделировании путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе.

Для упрощения компоновки взаимосвязанного оборудования и уменьшения длины технологических связей генетический алгоритм был дополнен методом кластеризации, что помогло сократить число итераций для достижения оптимального результата.

Математическая формулировка задачи компоновки

Содержательная постановка задачи компоновки может быть сформулирована следующим образом: определить с учетом всех правил, требований и ограничений такое пространственное расположение оборудования технологических систем с заданной структурой технологических связей и такие габариты производственного помещения, при которых объём занимаемый оборудованием был бы минимальным.

С математической точки зрения, задача размещения оборудования формулируется как оптимизационная задача, состоящая из следующих этапов:

- 1) выбор целевой функции (ЦФ);
- 2) выбор переменной (AP_i);
- 3) выбор и формализация ограничений.

Основная сложность в постановке задач эффективной компоновки заключается в выборе ЦФ. Это связано, в первую очередь, с большим количеством критериев оптимальности, на основе которых формулируется ЦФ. Если размещаемые объекты аппроксимировать простейшими геометрическими фигурами или их комплексами то в практике проектирования основным критерием оптимизации компоновки может являться коэффициент заполнения пространства (коэффициент плотности компоновки):

$$K_V = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V_{all}}; \quad (1)$$

где V_i – объём i -го оборудования; n – количество единиц оборудования; V_{all} – объём производственного помещения, в котором производится компоновка.

Для двумерной задачи:

$$K_S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S_{all}}, \quad (1a)$$

где S_i – площадь которую занимает i -ое оборудование; n – также количество единиц оборудования; S_{all} – площадь производственного помещения, в котором производится компоновка.

Тогда ЦФ имеет следующий вид:

$$Extr V(R) \text{ , при } R \in V_M; \quad (2)$$

где V – объём размещения;

R – Оптимальный вариант оптимального размещения всего оборудования

$$R = \{F_i \ i = 0, n\} \in M; \quad (3)$$

M – множество допустимых вариантов компоновки;

$F_i = \{X_i, Y_i, q_i, W_i, H_i\}$ – вариант размещения и габаритные размеры i -ого оборудования;

X, Y – координаты расположения оборудования в помещении;

q – координаты вращения оборудования в помещении;

$W \times H$ – размеры параллелепипеда, описывающего i -е оборудование по осям X, Y ;

При постановке задачи оптимизации компоновки следует учесть следующие ограничения и допущения:

– наличие зон для ремонта и обслуживания оборудования:

$$W_i = Weq_i + Wserv_i, \quad H_i = Heq_i + Hserv_i \quad (4)$$

т.е. оборудование моделируется прямоугольником большей площади включающем зону обслуживания;

– отсутствие пересечений площадей оборудования друг с другом:

$$S(F_{i1}) \cap S(F_{i2}) = \emptyset; \ i1, i2 = 1, \dots, n; \ i1 \neq i2 \quad (5)$$

– отсутствие пересечений оборудования с элементами конструкции:

$$S(F_i) \cap S(F_j) = \emptyset; \ i = 1, \dots, k; \ j = 1, \dots, n \quad (6)$$

– минимальное расстояние между связанным оборудованием:

$$\bar{R}(F_i) - \bar{R}(F_j) \rightarrow \min \quad Con(F_i, F_j) \rightarrow \max \quad (7)$$

где $\bar{R}(F_i)$ радиус-вектор положения оборудования F_i , а $Con(F_i, F_j)$ - некая функция связи оборудования F_i, F_j

Таким образом, выражения (2...7) представляют собой математическую постановку задачи оптимизации компоновки. Отсутствие большого количества ограничений позволит использовать различные множества альтернативных решений для получения наиболее рациональных вариантов компоновки. В связи с этим, процесс оптимизации компоновки элементов связан с выбором стратегии размещения элементов, т.е. с поиском и определением последовательности операций алгоритма решения поставленной задачи.

Для поиска оптимальной последовательности размещения оборудования используем ГА, который оперирует понятиями «хромосома», «популяция», «генетические операторы» (ГО), адаптированными к решению задачи оптимального размещения ЕО. Применительно к данной прикладной задаче, хромосома представляет один из вариантов размещения ЕО, закодированный последовательностью размещения.

Применение генетического алгоритма для задачи компоновки

Все возможные решения задачи представлены в виде множества «популяции» особей. $\mathbf{Rall} = \{ R_0 \dots R_j \}$ Каждая особь имеет хромосому $R_i = \{ F_0 \dots F_n \}$ – совокупность параметров, описывающих информацию об одном из вариантов расположения оборудования n – общее число оборудования в помещении, длина хромосомы; Хромосома в алгоритме компоновки представляется следующим образом:

$$R = (F_0 \quad F_1 \quad \dots \quad F_n) = \begin{pmatrix} X_0 & X_1 & \dots & X_n \\ Y_0 & Y_1 & \dots & Y_n \\ q_0 & q_1 & \dots & q_n \\ W_0 & W_1 & \dots & W_n \\ H_0 & H_1 & \dots & H_n \end{pmatrix}$$

где F – ген, размещения i -ой единицы оборудования который несет в себе информацию о расположении оборудования и его размерах. Необходимо определить наилучший вариант размещения оборудования, что значит найти наиболее приспособленную особь к условиям задачи.

Краткое описание генетического алгоритма

0 Генерация первой популяции с размером n :

1 Селекция. Выбор родителей.

2 Скрещивание генов родителей.

3 Мутация. Случайное изменение потомков.

4 Оценка пригодности потомков.

5 Выбор лучшего потомка в новое поколение (выбор осуществляется по коэффициенту плотности компоновки, который определяется по выражению(1)).

6 Вычисление ЦФ для всех членов популяции.

7 Упорядочивание популяции по убыванию ЦФ.

8 Проверка условия останова. В случае удовлетворения– конец, если нет– переход к п. 7.

9 Выбор некоторого подмножества особей и применение ГО к данным особям.

8 Проверка выполнения ограничений (2...7) для новых особей. Отбор допустимых особей и реконфигурация популяции. Переход к п. 5.

Оператор скрещивания генов родителей.

Случайным образом из диапазона [1,n-1] выбирается число k точка скрещивания 2 хромосом родительских особей, номер колонки в матрицах. Затем 2 особи обмениваются своими генами и формируются 2 новых дочерних особи с новым набором хромосом, путем обмена столбцов относительно точки скрещивания:

$$Cros[A, B] = Cros [(A1|A2), (B1|B2)] \rightarrow (A1|B2);$$

В случае компоновки оборудования набор хромосом дочерней особи будет выглядеть следующим образом:

$$Cros[R1, R2] = \begin{pmatrix} X_{01} & \dots & X_{k1} & X_{k+12} & \dots & X_{n2} \\ X_{01} & \dots & Y_{k1} & Y_{k+12} & \dots & Y_{n2} \\ q_{01} & \dots & q_{k1} & q_{k+12} & \dots & q_{n2} \\ W_{01} & \dots & W_{k1} & W_{k+12} & \dots & W_{n2} \\ H_{01} & \dots & H_{k1} & H_{k+12} & \dots & H_{n2} \end{pmatrix}$$

Оператор скрещивания реализован следующим образом

k= rnd(n)

augment(submatrix(R1,0,4,0,k), submatrix(R2,0,4,k,n))

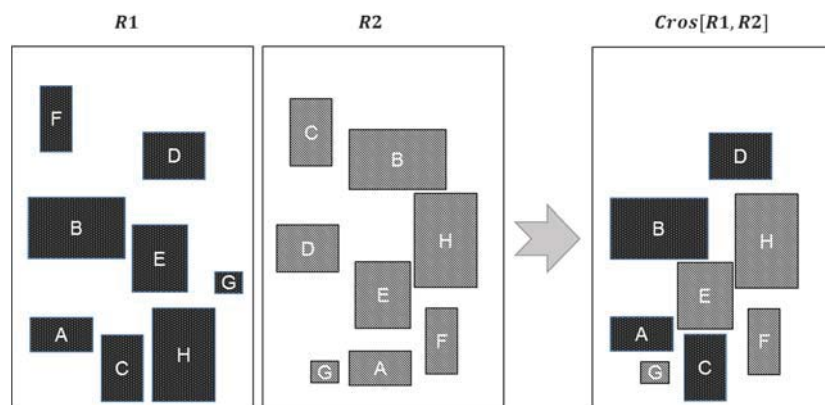


Рисунок 1 Иллюстрация скрещивания генов R1 и R2

Описание процедуры мутации генов.

Случайным образом выбирается ген, который в последствии будет подвергнут мутации.

k= rand (от 0, до +n)

Мутация заключается в изменении координат оборудования на величину в определенном интервале (от -r, до +r)

Xс= rand (от -r, до +r)

$Y_c = \text{rand}(\text{от } -r, \text{ до } +r)$

$q_c = \text{rand}(\text{от } -r, \text{ до } +r)$

$$M[R] = \begin{pmatrix} X_1 & \dots & X_k + X_c & \dots & X_n \\ Y_1 & \dots & Y_k + Y_c & \dots & Y_n \\ q_1 & \dots & q_k + q_c & \dots & q_n \\ W_1 & \dots & W_k & \dots & W_n \\ H_1 & \dots & H_k & \dots & H_n \end{pmatrix}$$

Описание алгоритма кластеризации для определения групп взаимосвязанного оборудования

Кластеризация (или кластерный анализ) — это задача разбиения множества объектов на группы, называемые кластерами. Внутри каждой группы должны оказаться «похожие» объекты, а объекты разных группы должны быть как можно более отличны. Главное отличие кластеризации от классификации состоит в том, что перечень групп четко не задан и определяется в процессе работы алгоритма.[]

Решением задачи кластерного анализа является разбиение, удовлетворяющее некоторому условию оптимальности. Этот критерий может представлять собой некоторый функционал, выражающий уровни желательности различных разбиений и группировок. Этот функционал часто называют целевой функцией. Задачей кластерного анализа является задача оптимизации, т.е. нахождение минимума целевой функции при некотором заданном наборе ограничений. Примером целевой функции может служить, в частности, сумма квадратов внутригрупповых отклонений по всем кластерам. Метод достаточно эффективно применялся для определения групп взаимосвязанного оборудования. С целью сокращения магистралей и линий связи между оборудованием.

Формируется симметричная матрица связи A оборудования, по главной диагонали которой располагаются максимальные возможные значения связи, а в остальных ячейках располагается условный вес связи $SC_{i,j}$

Вес связи равен числу интерфейсов, умноженный на класс оборудования. Чем больше интерфейсов у двух систем, тем выше их вес связи.

$$A = \begin{pmatrix} MAX & SC_{2,j} & SC_{i,j} & \dots & SC_{n,j} \\ SC_{i,2} & MAX & & \dots & \\ SC_{i,j} & & MAX & & \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \\ SC_{i,n} & & & & MAX \end{pmatrix}$$

Для кластеризации матрицы был применён (BEA - Bond Energy Algorithm)

1. Выбирается столбец случайным образом (для удобства выбирается 1 столбец)
2. Запускается цикл от 2 до n $i=2 \dots n$
3. Считается «энергия связи ЕС» первого столбца с о всеми остальными столбцами в матрице

$$EC = A_{1j} \times A_{ij} \quad j=0 \dots n \quad (8)$$

4. Столбец с максимальной энергией связи располагается рядом с первым столбцом с права (т.е вторым в матрице)
5. Поскольку матрица должна оставаться симметричной необходимо также поместить строчку.
6. Выбираются кластеры на основе предпочтений специалистов.
7. Возврат к пункту 2, и повторение алгоритма для следующего столбца

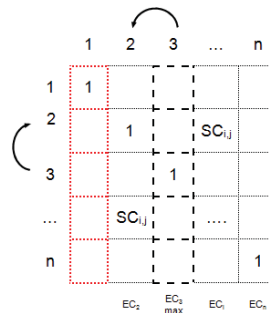


Рисунок 2 Иллюстрация алгоритма для первого столбца, $i=2$

Ниже представлен пример работы алгоритма, результатом которого являются 3 кластера - группы оборудования, которые следует располагать рядом друг с другом.

1 группа 0,1,8,4

2 группа 5,2,6,9

3 группа 3,7

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	4	1	0	4	1	1	0	3	1
1	4	5	0	1	3	1	1	0	4	1
2	1	0	5	0	1	3	3	0	1	2
3	0	1	0	5	0	0	0	4	0	1
4	4	3	1	0	5	1	0	0	4	1
5	1	1	3	0	1	5	3	0	1	3
6	1	1	3	0	0	3	5	0	1	2
7	0	0	0	4	0	0	0	5	1	0
8	3	4	1	0	4	1	1	1	5	1
9	1	1	2	1	1	3	2	0	1	5

я	0	1	8	4	5	2	6	9	3	7
0	5	4	3	4	1	1	1	1	0	0
1	4	5	4	3	1	0	1	1	1	0
8	3	4	5	4	1	1	1	1	0	1
4	4	3	4	5	1	1	0	1	0	0
5	1	1	1	1	5	3	3	3	0	0
2	1	0	1	1	3	5	3	2	0	0
6	1	1	1	0	3	3	5	2	0	0
9	1	1	1	1	3	2	2	5	1	0
3	0	1	0	0	0	0	0	1	5	4
7	0	0	1	0	0	0	0	0	4	5

Рисунок 3 Иллюстрация алгоритма для первого столбца, $i=2$

Для единиц оборудования, которые находятся в одном кластере радиус-вектор в условии (7) должен быть минимальным.

Пример применения методов при компоновке здания NUBN

Список помещений, которые необходимо скомпоновать в здании:

0. A MV switchgear room — Комната распреустройств среднего напряжения
1. B LV switchgear room (6 train) — Комната распреустройств низкого напряжения, 6 канала
2. C LV switchgear room (6b train) — Комната распреустройств низкого напряжения 6b канала
3. D Motor-Generator power equipment room — Помещение распреустройств для мотор-генераторов.
4. E Transformer room (6 train) — Трансформаторная 6 канала
5. F Motor-Generator — Помещение для мотор-генераторов.
6. G Transformer room (10 train) — Трансформаторная 10 канала
7. H LV switchgear room (10 train) — Комната распреустройств низкого напряжения 10 канала
8. X Diesel-generator — Дизель-генераторная установка
9. Y Cable tunnel (10 train) — Кабельный туннель 10 канала
10. Z Cable tunnel (6 train) — Кабельный туннель 6 канала

Формируется исходная матрица связей. «Сила связи» на усмотрения специалиста варьируется от 0 – когда, нет связи и оборудование можно расположить отдельно; до 5 - когда оборудование необходимо расположить как можно ближе.

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	A	B	C	D	E	F	G	H	X	Y	Z	
0	A	5	0	0	0	2	2	2	0	0	2	0
1	B	0	5	1	1	5	0	0	0	0	0	5
2	C	0	1	5	4	0	5	0	0	4	0	5
3	D	0	1	4	5	0	5	0	0	0	0	2
4	E	2	5	0	5	5	0	0	0	0	0	1
5	F	2	0	5	5	0	5	0	0	0	0	0
6	G	2	0	0	0	0	0	5	5	0	2	0
7	H	0	0	0	0	0	0	5	5	3	5	1
8	X	0	0	4	0	0	0	0	3	5	0	0
9	Y	2	0	0	0	0	0	2	5	0	5	0
10	Z	0	5	5	2	1	0	0	1	0	0	5

Результат кластеризации с использованием «BEA - Bond Energy Algorithm»
 Размер и границы кластера выбираются на усмотрение специалиста. Было выбрано 3 кратера.

		0	6	7	9	8	2	3	5	10	1	4
	A	G	H	Y	X	C	D	F	Z	B	E	
0	A	5	2	0	2	0	0	0	2	0	0	2
6	G	2	5	5	2	0	0	0	0	0	0	0
7	H	0	5	5	5	3	0	0	0	1	0	0
9	Y	2	2	5	5	0	0	0	0	0	0	0
8	X	0	0	3	0	5	4	0	0	0	0	0
2	C	0	0	0	0	4	5	4	5	5	1	0
3	D	0	0	0	0	0	4	5	5	2	1	0
5	F	2	0	0	0	0	5	5	5	0	0	0
10	Z	0	0	1	0	0	5	2	0	5	5	1
1	B	0	0	0	0	0	1	1	0	5	5	5
4	E	2	0	0	0	0	0	0	0	1	5	5

Раскладка помещений, сгенерированная генетическим алгоритмом упаковки прямоугольников представлена на рисунке 5. Выполнение алгоритма было остановлено после $2,1 \cdot 10^8$ итераций, после того как были выявлены основные закономерности.

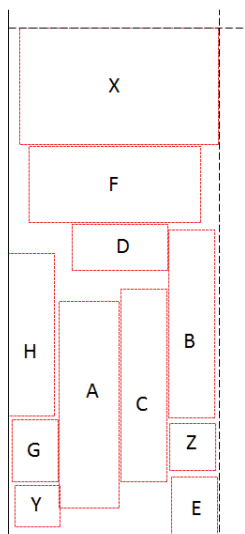


Рисунок 5 Раскладка помещений, сгенерированная генетическим алгоритмом

На основе результатов моделирования был подготовлен компоновочный чертеж на отметке +4,900, рисунок 4. Элементы Y и Z являющиеся кабельными каналами расположены на отметку ниже.

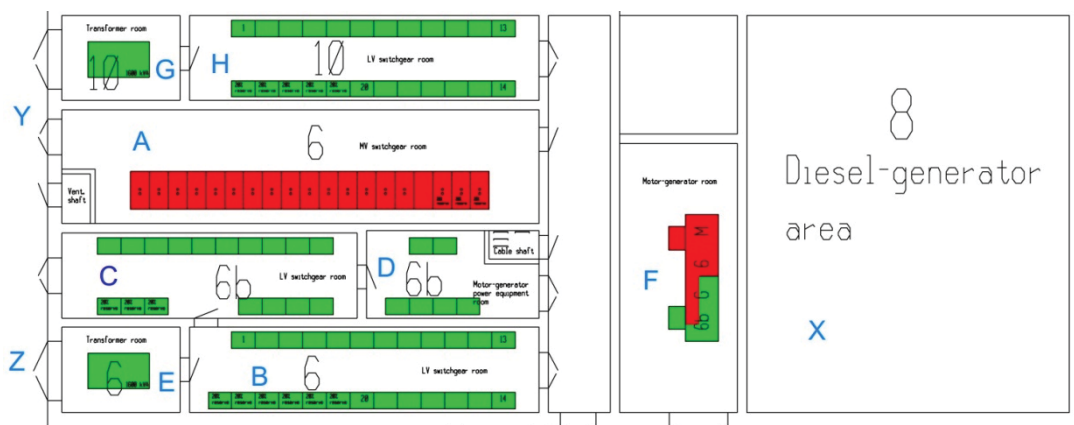


Рисунок 6 Окончательная компоновка одного канала в здании 12 UBV

Применение методов к другим зданиям «ядерного острова»

- Здание безопасности UKD – метод не применялся, Уменьшение было достигнуто за счет изменения типа оборудования и отказа от межканального коридора и лифтов.
- **Вспомогательный корпус UKA** – метод применялся не в полном объеме. Была подготовлена диаграмма Венна, и предварительные рекомендации были преданы проектировщикам. После возможности по интерпретации требований ожидается дополнительная переконпоновка.

- **Здание ядерного обслуживания УКС** – был проведен подробный анализ технологических и электрических систем. И выполнена кластеризация матрицы связей. Было выявлено три отчётливых кластера советующих зонам различного доступа. Затем для каждой зоны была составлена более подробная матрица связей. Прорисованы эскизы помещений.
- **Здание управления UCSB** – Здание было сконструировано вручную, на что ушло 2,5 месяца, и с применением разработанных алгоритмов, за 1,5 часа. После чего было проведено сравнение результатов компоновок. В результате сравнения двух вариантов были выявлены похожие паттерны и закономерности в расположении оборудования.
- **Здание дизельных станций аварийного энергоснабжения UBS** –Для удовлетворения условиям безопасности был добавлен эвакуационный коридор. Причем его длина должна быть минимальной. Для решения этой задачи был применён модифицированный алгоритм компоновки, в котором эвакуационный коридор представлялся как оборудование с максимальной «силой связи» Была составлена матрица взаимосвязей оборудования и проведен кластерный анализ.
 - **Здание блочной дизельной UBN** – После идеи отказа от дизелей 5 и 6 каналов. И потенциального размещения дизелей 7 и 8 каналов. Изначально было принято решение условно разделить здание на электрическую часть, в которой размещаются электротехнические помещения и технологическую для расположения дизель-генераторной установки и баков хранения топлива.

Заключение

Опыт применения показал, что методы достаточно эффективно справляется с компоновкой электротехнического оборудования. Для компоновки технологического оборудования следует дополнить условия задачи технологическими ограничениями такими как: ограничение на длину и количество изгибов трубопроводов с вязкими жидкостями; обеспечение требуемой скорости потока в трубопроводах; исключение застойных зон для жидкостей и газов. Эвакуационные пути следует моделировать как помещения с максимальной силой связи.

При моделировании большого числа систем и помещений существенно возрастает сложность задачи и время выполнения расчета. 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. Оба метода можно использовать совместно, либо независимо друг от друга, также можно применять комбинацию методов для решения различных подзадач в рамках одной задачи.

Использование методов компоновки оборудования существенно сокращает сроки проработки компоновок оборудования и помещений что позволит проектировщикам, в более короткие сроки получать оптимальные проектные решения по соответствующим задачам.

Используемая литература

1. Christopher W. Lapp, Michael W. Golay // Modular design and construction techniques for nuclear power plants, Nuclear Engineering and Design 172, ELSEVIER 1997, 327-349

2. Егоров, С.Я. Автоматизация компоновки оборудования в цехах ангарного типа. Ч. 1. Размещение технологического оборудования // Химическая промышленность. – 2003. – № 8. – С. 21 – 28.
3. An Approach to Plant Layout Optimization / H. Schmidt-Traub, T. Holtkotter, M. Lederhose, P. Leuders // Chem. Eng. Technol. – 1999. – № 22. – P. 499 – 504.