

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

### 6.1. О нелинейных задачах оптимального проектирования. Комплекс подпрограмм поиска экстремумов

При проектировании технических устройств и систем всегда возникают задачи принятия оптимальных решений. Для выбора наилучшего (в некотором смысле) варианта проектировщику необходимо решить задачи как структурной, так и параметрической оптимизации. Процесс структурной оптимизации трудно формализуем и осуществляется путем изменения топологии, структурной схемы, выполняемой непосредственно проектировщиком. Задачу выбора оптимальных параметров проектируемого устройства часто можно сформулировать в виде непрерывной экстремальной задачи и для ее решения применить методы нелинейного программирования.

Оптимальное решение принимают на основе решения одной из экстремальных задач:

безусловной минимизации

$$\begin{aligned} \min f(x); \\ x \in X \end{aligned} \tag{6.1}$$

условной минимизации (нелинейного программирования)

$$\begin{aligned} \min f(x), \\ x \in X \\ X = \{x \in E^n; g(x) = 0; h(x) \leq 0\} \end{aligned} \tag{6.2}$$

где вектор-функция  $g$  задает ограничения типа равенств,  $h$  - ограничения типа неравенств;

многокритериальной (векторной) оптимизации

$$\min_{x \in X} f_1(x), \min_{x \in X} f_2(x), \dots, \min_{x \in X} f_k(x). \quad (6.3)$$

Обычно качество численного метода оптимизации характеризуют следующими основными факторами: областью сходимости; скоростью сходимости; временем выполнения одной итерации; классом решаемых задач и т.д. Численное решение задач (6.1)-(6.3) при оптимальном проектировании технических устройств часто связано со следующими трудностями:

относительно большое время однократного расчета целевой функции из-за сложности моделируемых устройств;

многоэкстремальность целевой функции;

многокритериальность прикладных задач;

частичная целочисленность решаемых задач;

высокая размерность практических задач;

невозможность получения аналитических выражений для производных минимизируемых функционалов;

отсутствие универсальных алгоритмов, пригодных для решения любой задачи.

Поэтому в составе прикладного программного обеспечения САПР необходимо иметь комплекс подпрограмм, реализующих разные методы оптимизации и позволяющих решать задачи различного типа. Иногда целесообразно проводить вычисления, последовательно используя разные методы, т.е. осуществляя многометодную оптимизацию.

При решении прикладных задач необходимо выполнить длинные и сложные вычисления для определения значений функции и ограничений, а явные выражения для производных найти невозможно. Применение конечноразностных оценок производных ограничено временем и погрешностями вычислений. Поэтому целесообразно применение методов, в которых информация о производных не

используется (методов прямого поиска). Эти методы обычно не требуют от функций цели никаких свойств, кроме непрерывности и оказываются иногда более устойчивыми, чем градиентные. Недостатком прямого поиска является то, что он может привести в достаточно хорошую, но не оптимальную точку, однако на практике этого бывает достаточно.

Для решения задачи безусловной минимизации реализованы подпрограммы, не требующие вычисления производных. В них использованы методы:

`directm` - метод прямого поиска Хука и Дживса;

`komplex` - модифицированный метод комплексного поиска;

`simplex` - метод симплексного поиска Нелдера и Мида;

`evextr` - метод поиска глобального экстремума перебором на неравномерной сетке.

Если целевая функция многоэкстремальна, первые три подпрограммы обеспечивают нахождение локального минимума вблизи выбранного начального приближения. Применение локальных методов для отыскания глобального минимума без сужения класса многоэкстремальных задач обычно сводится к локальным спускам из последовательности случайно или регулярно выбираемых начальных точек.

Весьма эффективным оказался следующий алгоритм коррекции начального приближения в задачах (6.1) или (6.2). В точке  $x^0 \in X$  строятся многогранники с  $2n$  вершинами, координаты которых определяются по выражению

$$b_{i,j}^N = x_j^0 + (-1)^N a^N (2R - 1), N = 1, 2, \quad (6.4)$$

где  $a$  - параметр,  $a^N = 2a^{N-1}$ ;  $b_{i,j}$  - вершины многогранника,  $i = 1, 2, \dots, 2n$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $R$  - случайные числа, равномерно распределенные на интервале  $(0, 1)$ .

После  $N = 5 - 10$  попыток в качестве начального приближения выбирается вершина  $b$  с наилучшим значением целевой или вспомогательной функции. Полученная в результате решения соответствующей экстремальной задачи точка  $x^*$  принимается в качестве новой  $x^0$  и описанная процедура 2 - 3 раза повторяется.

Пусть необходимо с заданной точностью определить величину глобального максимума функции  $n$  переменных и найти точку  $x^*$  внутри  $n$ -мерного прямоугольного параллелепипеда, где это приближенное значение достигается,

$$\max_{x \in X} f(x) - f(x^*) \leq \varepsilon, \quad X \subset E^n$$

Достаточным условием существования оценки глобального экстремума при конечном числе испытаний является ограниченность разности значений функции некоторой разностью значений аргумента (липшицевость).

По определению, условие Липшица означает, что для любых  $x^1$  и  $x^2$  из  $X$  существует положительное число  $c$  такое, что

$$|f(x^1) - f(x^2)| \leq c \|x^1 - x^2\|,$$

где  $\|z\|$  - норма вектора  $z$ ,  $\|z\| = (\sum_{i=1}^n z_i^2)^{1/2}$ .

Удобным с точки зрения алгоритмизации явилось покрытие множества  $X$  последовательностью  $n$ -мерных кубов, вписанных в  $n$ -мерные сферы  $U_1, U_2, \dots, U_m$  [16]. Радиусы этих сфер с центрами в точке  $x^j$  определяются по выражению

$$R_j + [F_k - f(x^j) + \varepsilon]c, \quad (6.5)$$

где  $F = \max\{f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_k)\}$ .

Если величина константы Липшица  $c$  заранее неизвестна, задача решается для  $c = c_0$ ,  $c = 2c_0$  и т.д. до тех пор, пока результат отличается от предыдущего значения не более, чем на  $\varepsilon$ .

Для поиска экстремумов непрерывно дифференцируемых функций в алгоритме [16] используется сочетание перебора на неравномерной сетке с отысканием локальных экстремумов методом наискорейшего спуска. Обращение к подпрограмме нахождения локального экстремума происходит, если на  $k$ -м шаге выполнено условие  $\varepsilon c < [f(x^k) - F_{k-1}]z$ , где  $0 < c < 2$

При минимизации функционалов, являющихся результатами моделирования, вычисление производных требует  $n$  либо  $2n$  дополнительных вычислений их значений. Поэтому для отыскания локальных экстремумов в алгоритме глобальной оптимизации целесообразно применить один из методов прямого поиска, например, симплексный.

Приведем результаты решения многоэкстремальной задачи

$$\max 1/36 \sum_{j=1}^6 [\sin 2\pi(x_j + j/5)].$$

$$0 \leq x \leq 1$$

$c$	$m$	Подпрограмма evextr		Подпрограмма [37]	
		$F(x^*)$	$N$	$F(x^*)$	$N$
0,2	1	0,970545	561	-	-
	-1	0,822347	1153	-	-
0,4	1	0,996866	809	0,992827	100
	-1	0,954853	1525	0,906307	2569
0,6	1	0,999932	1441	0,992827	1664
	-1	0,988378	11070	0,986959	96288

В качестве первого начального приближения принимался вектор  $x = 0,5$ . Расчеты выполнены при  $\varepsilon = 0,01$ ,  $c_1 = 0,1$  и  $c = 0,2; 0,4; 0,6$ , причем при каждом последующем поиске максимума в качестве начального приближения брался предыдущий результат. При  $m < 0$  локальный поиск не использовался.

Нетрудно видеть, что метод перебора на неравномерной сетке обеспечивает решение задачи с приемлемым числом вычислений функции  $N$  только в сочетании с локальным спуском.

В методах параметризации целевой функции, весьма эффективных для решения задачи (6.2), последняя сводится к безусловной минимизации, а вспомогательный параметр меняется по определенному правилу.

Составляется вспомогательная функция:

$$M(x, \eta) = [f(x) - \eta]^2 + S(x), \quad (6.6)$$

где  $S(x)$  - штрафная функция.

Штрафную функцию можно формировать в виде [17]

$$S(x) = \sum_{i=1}^1 g_i^2(x) + \sum_{i=1}^c \psi h(x), \quad (6.7)$$

где  $\psi(y) = 0$  если  $y \leq 0$ ,  $\psi(y) = k_1 y^3$  если  $0 \leq y \leq r$ ,  $\psi(y) = y^2 + k_2 y + k_3$  если  $r < y$ ;  $r$  - достаточно малое число, обычно  $r = 10^{-4}$ ; числа  $k_1, k_2, k_3$  определяются из условия непрерывности первой и второй производной функции  $\psi$ :  $k_1 = 1/3 r, k_2 = -r, k_3 = r^2/3$ .

При больших значениях  $|g_i|, h_i^+$  зависимость  $S$  от  $|g_i|, h_i^+$  - квадратичная.

Существо метода параметризации целевой функции заключается в последовательности нахождения точек  $x_k$  и увеличении параметра  $\eta_k$  так, что  $\eta_k \Rightarrow f(x^*)$ . Нижняя оценка  $\eta_0$  оптимального значения целевой функции считается известной,  $\eta_0 \leq f(x)$ . Эту оценку можно получить, численно решив задачу безусловной минимизации  $f(x)$ . В соответствии с двумя версиями Моррисона [74] параметр выбирается как

$$\eta_{k+1} = \eta_k + \sqrt{M(x_k, \eta_k)} \quad (6.8)$$

либо

$$\eta_{k+1} = \eta_k + M(x_k, \eta_k) / (f(x_k) - \eta_k).$$

Критериями для окончания поиска являются: максимальное число итераций безусловной минимизации функции  $M(x, \eta)$ , а также выполнение одного из неравенств:

$$\begin{aligned} M(x, \eta) &< \varepsilon_1; \\ |M_{k+1} - M_k| &< \varepsilon_2; \\ \|x_{k+1} - x_k\| &< \varepsilon_3, \end{aligned} \tag{6.9}$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  - малые положительные числа.

Если критерий эффективности оптимизируемой системы - известная скалярная функция, возможны лишь вычислительные трудности, возникающие при решении экстремальных задач (6.1)-(6.2). Методологические проблемы появляются в случае многокритериальной оптимизации, поскольку необходимо определить наилучшую альтернативу в задаче с несколькими целевыми функциями (6.4), которые достигают минимума в различных точках пространства переменных.

При использовании априорных процедур многокритериальной оптимизации полагают, что задания множества альтернатив  $X$  и целевых функций  $f_1(x), \dots, f_k(x)$  вполне достаточно для определения оптимального решения [15]. Вид глобального критерия эффективности определяется типом решаемой задачи. В задачах со стоимостными критериями применяют принцип равномерной оптимальности

$$\Phi = \sum_{i=1}^k f_i(x). \tag{6.10}$$

Если критерии  $f_i(x)$  выражаются в различных единицах измерения, их приводят к безразмерному виду. Исходные целевые функции приводят к безразмерному виду  $f_i^0(x)$ , используя преобразования

$$f_i^0(x) = f_i(x)/a_i^{max},$$

либо

$$f_i^0(x) = [f_i(x) - a_i^{min}]/(a_i^{max} - a_i^{min}),$$

где  $a_i^{max}$  - максимально возможные,  $a_i^{min}$  - минимально допустимые значения критериев  $f_i(x)$ . Затем критерии сворачивают в обобщенный критерий,

$$\Phi(\alpha_1, f_1^0, \dots, \alpha_k, f_k^0), \sum_{i=1}^k \alpha_i = 1, \quad (6.11)$$

где  $\alpha_i$  - коэффициенты важности.

Одним из самых распространенных является мультипликативный критерий

$$\Phi = \prod_{i=1}^k f_i^0(x)^{\alpha_i}, \quad (6.12)$$

который называют принципом справедливого компромисса [15]. Если в процессе оптимизации значения части критериев  $f_i^+(x)$  необходимо увеличивать, а остальных  $f_i^-(x)$  - уменьшать, то

$$\Phi = \prod_{i=1}^l f_i^-(x)^{\alpha_i} / \prod_{i=l+1}^k f_i^+(x)^{\alpha_i}. \quad (6.13)$$

Метод параметризации целевой функции обобщен в работе [19] на случай задачи (6.3). Вспомогательная функция имеет вид

$$R(x, \eta) = \sum_{i=1}^k [f_i(x) - \eta_i]^2 + S(x). \quad (6.14)$$

Для решения задач условной и глобальной минимизации реализованы подпрограммы, не требующие вычисления производных. В них использованы алгоритмы:

glextr - поиск глобального экстремума последовательным уточнением решения комплексным методом;

morfm - решение общей задачи нелинейного программирования с векторной целевой функцией методом параметризации Моррисона;

rfm - решение общей задачи нелинейного программирования методом параметризации Моррисона.

Используя формулы (6.10), (6.12), (6.13), можно решить задачу векторной оптимизации (6.3) при ограничениях общего вида с помощью подпрограммы rfm.

Приведем результаты решения с помощью подпрограммы glextr модельной задачи оптимизации

$$\max f(x) = 1,5 x_1^2 \exp[1 - x_1^2 - 20,25(x_1 - x_2)^2] + (0,5x_1 - 0,5)^4 \times \\ \times (x_2 - 1)^4 \exp[2 - (0,5x_1 - 0,5)^4 - (x_2 - 1)^4],$$

в которой ограничения определяются неравенствами:

$$h_1(x) = (x_1 - 2,2)^2 + (x_2 - 1,2)^2 \leq 2,25;$$

$$h_2(x) = (x_1 - 2)^2/1,44 + x_2^2/4 \leq 1,$$

а область поиска представляет собой

$$X = \{ x \in E^2 : 0,7 \leq x_1 \leq 3,7, 0 \leq x_2 \leq 2,7 \}.$$

После старта из точки  $x^0 = (1,5; 1,35)$  в результате коррекции по (6.4) получена новая стартовая точка  $x^0 = (2,076360; 2,231799)$  и после 4-х итераций в подпрограмме rfm решение  $x^* = (0,9440956; 0,9466618)$ ;  $f(x^*) = 1,490255$ , близкое к глобальному экстремуму. Общее число вычислений целевой функции на всех итерациях поиска составило 188.

## 6.2. Стратегия синтеза и оптимизации технологических схем КС

Математическая постановка задачи оптимизации КС сведена к следующему представлению. Имеется система элементов (модулей) единиц оборудования, каждый из которых описывается векторным уравнением

$$B^k = \Phi(A^k, C^k), \tag{6.15}$$

где  $A^k$ ,  $B^k$ ,  $C^k$  - соответственно векторы входных, выходных и управляющих переменных в  $k$ -ом модуле. Модули связаны друг с другом определенным образом в соответствии с технологической схемой уравнениями связи  $A^{k+1} = B^k$ .

Независимые переменные экстремальных задач (6.1)-(6.3) образуются управляющими и входными переменными модулей. Качество синтезируемой системы оценивается критерием эффективности

$$K_e = K_e(C, A, B). \quad (6.16)$$

Задача оптимизации решается при ограничениях на переменные, в общем случае задаваемых как

$$(C, A, B) \in X \quad (6.17)$$

причем  $X$  - некоторое множество в произведении пространств  $E_C \times E_A \times E_B$ .

Ограничения (6.17) распадаются на ряд ограничений, связанных с отдельными элементами и переменными схемы,  $C^k \in X_C^k$ ,  $A^k \in X_A^k$ ,  $B^k \in X_B^k$ , где  $X_C^k$ ,  $X_A^k$ ,  $X_B^k$  - множества в пространствах  $E_C$ ,  $E_A$ ,  $E_B$ .

В общем классе ограничений преобладают ограничения типа неравенств на управления в модулях

$$h_C^k(C^k) \leq 0 \quad (6.18)$$

и ограничения типа неравенств на входные и выходные переменные модулей

$$h_{A,B}^k(A^k, B^k) \leq 0. \quad (6.19)$$

Здесь под управлениями понимаются геометрические, режимные и управляющие параметры модулей.

Задача оптимизации КС состоит в определении значений варьируемых независимых переменных  $C$  и  $A$ , для которых критерий эффективности  $K_e$  принимает экстремальное значение.

В качестве критериев эффективности используют как экономические критерии в виде технико-экономических показателей (приведенные затраты, себестоимость, приведенный доход, средняя прибыль и т.д.), так и технологические критерии (термодинамический или эксергетический КПД, производительность, удельные затраты энергии, масса оборудования и т.д.).

На различных этапах технологического проектирования возникают задачи семи классов [24], причем следующие задачи можно в полной мере можно отнести к задачам проектирования КС:

1. При заданных типах и свойствах элементов КС необходимо выбрать элементы системы и определить структуру технологических связей, при которой критерий эффективности  $K_e$  будет иметь оптимальное значение;
2. При заданных типах элементов необходимо определить структуру связей, основные характеристики элементов КС и потоков в ней, обеспечивающих получение требуемых холодопроизводительности и количества жидкого криопродукта при оптимальном значении  $K_e$ ;
3. При заданном множестве альтернативных вариантов топологии, обеспечивающих выполнение цели функционирования КС, необходимо определить технологическое решение, характеристики элементов и технологических потоков системы, обеспечивающих оптимальное значение  $K_e$ ;
4. При заданной технологической схеме КС необходимо определить характеристики элементов и технологических потоков, которые обеспечивают достижение цели функционирования КС при оптимальном значении  $K_e$ ;
5. При заданной технологической схеме КС, характеристиках элементов и потоков необходимо изменить их таким образом, чтобы обеспечить достижение цели функционирования КС и оптимум  $K_e$ .

В соответствии с данными работы [24] для решения задач первого и второго классов применяют декомпозиционный и эвристический принципы синтеза, третьего класса - интегрально-гипотетический,

четвертого и пятого - эволюционный и эвристический. Применение любого из перечисленных принципов синтеза в САПР основано на использовании математических моделей разного уровня сложности и методов оптимизации как КС в целом, так и отдельных ее элементов.

Интегрально-гипотетическая процедура синтеза состоит из двух основных этапов: создания гипотетической обобщенной технологической структуры; ее анализа и оптимизации. Обобщенная технологическая структура должна включать математические модели отдельных элементов, альтернативные варианты технологии и уравнения связи между элементами.

Решение задачи синтеза с использованием интегрально-гипотетической процедуры осуществляется многоуровневым методом оптимизации. Этот метод [24] заключается в декомпозиции задачи оптимизации системы в целом на совокупность задач оптимизации элементов и согласовании полученных решений для элементов с учетом их структурной взаимосвязи в системе. Здесь очевидна аналогия такого подхода с восходящим (снизу вверх) проектированием программных комплексов. Недостатком такого подхода к проектированию является сложность объединения отдельных оптимальных решений в систему и трудность исправления ошибок, допущенных на первом этапе.

При нисходящем (сверху вниз) проектировании осуществляется последовательность шагов в направлении возрастающей конкретизации проекта. В работе [57] справедливо указано, что ни один из рассматриваемых подходов в чистом виде не является жизнеспособной методологией проектирования. Реальная стратегия проектирования всегда должна представлять собой разумное их сочетание.

В общем случае задача синтеза оптимальной технологической схемы является частично целочисленной, где одни переменные непрерывные, другие дискретные. Оптимальное решение задачи математического программирования (6.2), в которой содержится требование целочисленности переменных, может сильно отличаться от оптимального решения задачи с той же алгебраической структурой, но без требования целочисленности. Для решения частично целочисленных задач используют „процедуры расчлене-

ния“ - алгоритмы, в которых переменные разделяют на два подмножества и сначала варьируют переменные в первом подмножестве, затем во втором.

Переменные частично целочисленной задачи синтеза оптимальных схем КС естественным образом разделяются на два подмножества. Непрерывными переменными являются характеристики потоков в точках технологической схемы и некоторые геометрические размеры турбодетандеров и др., целочисленными - параметры теплообменников, детандеров при использовании унифицированных рядов аппаратов и машин, количество компрессоров в системе, число резервных элементов и т.д. Целочисленные задачи возникают и при разработке рядов унифицированного оборудования [30].

Основные характеристики турбодетандеров (расход, КПД) являются непрерывными функциями условий на входе и степени расширения и существенно влияют на значение критерия эффективности. Поэтому методически неверно выполнять оптимизацию схем при постоянных значениях КПД детандеров, как это сделано в ряде опубликованных работ. Оптимизация технологических схем КГУ должна осуществляться с применением достаточно строгих моделей турбодетандеров или включать оптимизацию самих детандеров.

Для криогенной техники наиболее типичными задачами оптимального проектирования являются задачи синтеза третьего и четвертого классов. Многоуровневая стратегия решения задачи третьего класса может включать следующие основные этапы:

1. Выбор одного из альтернативных вариантов технологической схемы.
2. Оптимизацию технологического (термодинамического) критерия эффективности на подмножестве непрерывных переменных решением общей задачи нелинейного программирования (6.2) в представлении (6.15)-(6.17).
3. Варьирование целочисленных переменных для оптимизации аппаратов (при известных из 2-го этапа характеристиках технологических потоков системы) и расчет технико-экономического критерия эффективности.

4. Переход к следующему варианту технологии и повторение 2-го и 3-го этапов.

5. Выбор оптимальной схемы и соответствующих ей аппаратов и машин на основе технико-экономического критерия эффективности.

Задача четвертого класса является частным случаем рассмотренной выше и включает все этапы кроме сравнения альтернативных вариантов. Задача пятого класса, по существу, представляет собой оптимизацию квазистационарных режимов работы, а решение ее состоит из одного 2-го этапа.

### **6.3. Экспертная система для выбора технологических схем**

Знания, которыми обладает специалист в какой-либо проблемной области можно разделить на формализованные (точные) и неформализованные (неточные). Формализованные знания представляются в статьях, книгах, руководствах в виде законов, формул, моделей и алгоритмов. Неформализованные данные редко попадают в публикации в связи с их субъективностью и приблизительностью. Эти знания являются результатом опыта работы и интуиции специалиста и представляют собой обычно совокупность эвристических приемов и правил.

Традиционное программирование основано на применении алгоритмов, т.е. формализованных знаний. Расширение сферы использования ЭВМ в науке и технике показало, что неформализованные задачи составляют очень важный и широкий класс задач. По Ньюэллу [76] к неформализованным относят задачи, обладающие хотя бы одной из следующих особенностей: алгоритмическое решение задачи неизвестно (хотя, возможно, и существует) или не может быть получено из-за ограниченности ресурсов ЭВМ; для определения задачи требуется символьное представление; не может быть точно определена целевая функция задачи. Нетрудно видеть, что задача выбора одного из альтернативных вариантов технологической схемы КС (первого этапа структурного синтеза) обладает всеми перечисленными свойствами.

Экспертные системы (ЭС), в отличие от обычных программных комплексов, предназначены для решения неформализованных задач и основаны на знаниях экспертов, помещенных в базу знаний (БЗ). Методы инженерии знаний в значительной степени инвариантны к конкретным областям применения, что позволяет успешно разрабатывать и использовать ЭС для самых разнообразных приложений. Среди типов задач, решаемых с помощью ЭС, - составление смыслового описания по входным данным и конструирование - разработка технической системы с заданными свойствами при соблюдении некоторых ограничений.

Нашей целью являлось создание исследовательского прототипа ЭС для решения задач выбора схем КГУ и определения независимых переменных при их параметрической оптимизации. Прототипы ЭС обычно создаются с помощью оболочек. Оболочки содержат основные компоненты ЭС в готовом виде, а для их использования необходимо подготовить БЗ о конкретной проблемной области. В качестве такой оболочки использована ЭС, описанная в книге [51] и реализованная с некоторыми модификациями на Паскале.

Для представления знаний о проблемной области в этой ЭС используются факты в виде пар [объект]=[значение]. Поскольку не все знания точно определены, ЭС выражает относительную уверенность в факте с помощью коэффициента доверия. Коэффициент доверия (кд), равный 100 означает абсолютную уверенность, 0 - самую низкую определенность. В этом случае факты записываются в виде [объект]=[значение], кд=[коэффициент доверия]. Если объекты могут иметь несколько значений, они объявляются многозначными и представляются в виде

[объект]=[значение1], кд=[коэффициент доверия1],  
[значение2], кд=[коэффициент доверия2],  
.....  
[значениеN], кд=[коэффициент доверияN].

Примеры фактов:

тип=рефрижераторная,ожижительная,комбинированная;

температура=3.6К-4.5К,4.5К-4.7К,больше\_6К;

давление=меньше\_0.5\_МПа,0.5-1\_МПа,больше\_1\_МПа;

произв\_реф=меньше\_200\_Вт,200-1000\_Вт,больше\_1000\_Вт;

схема=последовательные\_детандеры, кд=60;  
предв\_охлаждение=нет, кд=80;  
число\_ступеней=две, кд=60.

Следующий тип фактов - вопросы, значения которых устанавливаются путем задания вопроса пользователю. В системе определены вопросы 2-х типов - для выбора значения из списка и требующие ответа "да" или "нет". Примеры вопросов 1-го типа:

Какого типа установка Вам необходима?  
Какая надежность Вам необходима?  
Какое давление цикла?

и второго типа:

Будете ли Вы оптимизировать давление цикла?  
Я предлагаю винтовой компрессор, согласны?  
Я предлагаю схему с двумя ступенями расширения, согласны?

ЭС обрабатывает символическое представление проблемной области с помощью эвристических правил и метода обратной цепочки. В модели правил знания представляются совокупностью правил вида „ЕСЛИ – ТО“. ЭС с БЗ основанными на этой модели, называются продукционными системами. В системе продукций с обратными выводами с помощью правил строится дерево И/ИЛИ, связывающее в единое целое факты и заключения. Оценка этого дерева на основе фактов, имеющих в БЗ, и есть логический вывод. Условием останова системы является либо достижение первоначальной цели, либо окончание правил, применимых для достижения цели в ходе вывода.

В данной ЭС правила имеют следующий синтаксис:

правило(*n*): если  
    [объект]=[значение1] и  
    [объект]=[значение2] и  
    .....  
    [объект]=[значение*N*]  
то  
    [объект]=[значение *n+1*], кд=[коэффициент доверия] и

[объект]=[значение  $n+2$ ], кд=[коэффициент доверия] и  
.....  
[объект]=[значение  $N+M$ ], кд=[коэффициент доверия].

Приведем примеры правил:

правило14: если  
тип=рефрижераторная и  
произв\_реф=больше\_1000\_Вт  
то  
производительность=большая.

правило58: если  
схема=последовательные\_детандеры и  
предв\_охлаждение=нет  
то  
разделитель\_потоков=один и  
смеситель\_потоков=один.

правило86: если  
схема=последовательные\_детандеры и  
число\_ступеней=две и  
модель\_т/д=проект\_расчет  
то  
переменная\_  $G_{т/д}$ =расход\_в\_первой\_ступени и  
переменная\_  $\epsilon_{рс_т/д}$ =степень\_расширения\_в\_1-ой\_ступени  
и  
переменная\_  $n_{т/д}$ =не\_нужна.

правило199: если  
тип=рефрижераторная и  
ступень\_ожижения=с\_жидкостным\_детандером  
то  
пром\_дросселирование=не\_нужно.

Общее количество правил в данной БЗ - более 200. Действующими лицами в сеансе диалога на ЭВМ являются пользователь, желающий получить консультацию о схеме КГУ, и ЭС. Система целенаправленно задает вопросы о желаемых характеристиках КГУ, представляя возможные ответы в виде меню. Получив очередной ответ, ЭС пытается получить необходимый вывод. Если информации

оказывается недостаточно, система обращается к пользователю с новыми вопросами. Консультация заканчивается по получении заключения, а ее результаты помещаются в файл „Факты базы знаний“.

Приведем конкретные примеры работы ЭС.

1. Необходимо спроектировать рефрижераторную КГУ производительностью 20 кВт на температурном уровне 3,6 К с обычными требованиями к надежности и выбрать переменные для оптимизации.

Начало системы „Выбор схемы“.

Какого типа установка Вам необходима?

- 1.рефрижераторная
- 2.ожижительная
- 3.комбинированная

1

Какая надежность Вам необходима?

- 1.обычная
- 2.повышенная

1

На каком температурном уровне работает Ваша установка?

- 1.3.6К-4.5К
- 2.4.5К-4.7К
- 3.больше\_6К

1

Какое давление цикла?

- 1.меньше\_0.5\_МПа
- 2.0.5-1\_МПа
- 3.больше\_1\_МПа

3

Какую задачу Вы решаете?

- 1.оптимизация\_схемы
- 2.моделирование\_КРР

1

Будете ли Вы оптимизировать давление цикла?

- 1.да
- 2.нет

1

Будете ли Вы оптимизировать расход циркулирующего гелия?

1.да

2.нет

1

Я предлагаю схему с последовательными детандерами, согласны?

1.да

2.нет

1

Я предлагаю схему без предварительного охлаждения, согласны?

1.да

2.нет

2

Какова производительность Вашей установки?

1.меньше\_200\_Вт

2.200-1000\_Вт

3.больше\_1000\_Вт

3

Я предлагаю турбодетандер, согласны?

1.да

2.нет

1

Какая модель турбодетандера Вам необходима?

1.постоянный\_кпд

2.проект\_расчет

3.расчет\_режима

2

Я предлагаю схему с тремя ступенями расширения, согласны?

1.да

2.нет

1

Я предлагаю трехпоточную ванну, согласны?

1.да

2.нет

1

Необходимо ли охлаждение на промежуточном уровне?

1.да

2.нет

2

Я предлагаю СО с криогенным нагнетателем, согласны?

1.да

2.нет

1

Какая модель криогенного нагнетателя Вам необходима?

1. постоянный\_кпд

2. расчет\_режима

2

Какие удельные энергозатраты допустимы?

1. больше\_0.4\_КВт/Вт

2. 0.4-0.3\_КВт/Вт

3. меньше\_0.3\_КВт/Вт

3

Я предлагаю СО с жидкостным детандером, согласны?

1. да

2. нет

1

Я предлагаю поршневой компрессор, согласны?

1. да

2. нет

1

Конец консультации.

Результат консультации:

выполнение=да, кд=100

Конец консультации

## ФАКТЫ БАЗЫ ЗНАНИЙ

переменная\_eps\_др=не\_нужна, оп=100

переменная\_T\_2\_т/о\_со=не\_нужна, оп=100

двухпоточный\_т/о\_ступени\_ожижения=не\_нужен, оп=100

переменная\_M\_к/н=число\_Маха, оп=100

переменная\_d\_к/н=диаметр\_рабочего\_колеса, оп=100

подогреватель=не\_нужен, оп=100

переменная\_T\_3\_т/о=температуры\_основных\_потоков\_на\_выходах,  
оп=40

трехпоточный\_т/о=три, оп=40

модель\_3\_т/о=балансовые\_уравнения, оп=100

переменная\_T\_2\_т/о=температуры\_основного\_потока\_на\_выходах,  
оп=40

двухпоточный\_т/о=пять, оп=40

модель\_2\_т/о=балансовые\_уравнения, оп=100

модель\_аз-гел\_т/о=балансовые\_уравнения, оп=100

переменная  $G_{ag}$  т/о=расход гелия, оп=40  
азотно-гелиевый т/о=один, оп=40  
переменная  $G_{av}$ =расход азота, оп=40  
азотная ванна=трехпоточная, оп=40, нужна, оп=40  
переменная  $n$  т/д=не нужна, оп=100  
переменная  $eps$  т/д=степени расширения в 1 и 2 ступенях, оп=100  
переменная  $G$  т/д=расход в первой ступени, оп=100  
смеситель потоков=два, оп=40  
разделитель потоков=два, оп=40  
переменная  $G_k$ =расход циркулирующего гелия, оп=100  
переменная  $p_k$ =давление после компрессора, оп=100  
сосуд=, оп=100  
нагнетатель=криогенный нагнетатель, оп=100  
пром дросселирование=не нужно, оп=100  
ступень ожижения=с жидкостным детандером, оп=100  
детандер=турбодетандер, оп=100  
число ступеней=три, оп=100  
предв охлаждение=да, оп=40  
схема=последовательные детандеры, оп=100  
компрессор=поршневой, оп=100  
энергозатраты=малые, оп=100  
производительность=большая, оп=100  
гс=Не определено  
модель к/н=расчет режима, оп=100  
модель т/д=проект расчет, оп=100  
энергозатр реф=меньше 0.3 квт/вт, оп=100  
произв реф=больше 1000 вт, оп=100  
задача=оптимизация схемы, оп=100  
давление=больше 1 мпа, оп=100  
надежность=обычная, оп=100  
темп уровень=3.6к-4.5к, оп=100  
тип=рефрижераторная, оп=100  
запуск=, оп=100  
**КОНЕЦ ФАКТОВ БАЗЫ ЗНАНИЙ**

Соответствующая схема приведена на рис.6.5.

2. Необходимо спроектировать КГУ производительностью 2 кВт на температурном уровне 4,5 К и 250 л/ч жидкого гелия с повышенными требованиями к надежности и выбрать переменные для оптимизации.

Начало системы „Выбор схемы“.

Какого типа установка Вам необходима?

1.рефрижераторная

2.ожижительная

3.комбинированная

3

Какая надежность Вам необходима?

1.обычная

2.повышенная

2

На каком температурном уровне работает Ваша установка?

1.3.6К-4.5К

2.4.5К-4.7К

3.больше\_6К

2

Какое давление цикла?

1.меньше\_0.5\_МПа

2.0.5-1\_МПа

3.больше\_1\_МПа

2

Какую задачу Вы решаете?

1.оптимизация\_схемы

2.моделирование\_КРР

1

Будете ли Вы оптимизировать давление цикла?

1.да

2.нет

1

Будете ли Вы оптимизировать расход циркулирующего гелия?

1.да

2.нет

2

Я предлагаю схему с параллельными детандерами, согласны?

1.да

2.нет

1

Какова производительность Вашей установки?

- 1.меньше\_200\_Вт
- 2.200-1000\_Вт
- 3.больше\_1000\_Вт

3

Какова производительность Вашей установки?

- 1.меньше\_50\_л/ч
- 2.50-250\_л/ч
- 3.больше\_250\_л/ч

2

Я предлагаю схему с тремя ступенями расширения, согласны?

- 1.да
- 2.нет

1

Я предлагаю азотное предварительное охлаждение, согласны?

- 1.да
- 2.нет

1

Я предлагаю турбодетандер, согласны?

- 1.да
- 2.нет

1

Какая модель турбодетандера Вам необходима?

- 1.постоянный\_кпд
- 2.проект\_расчет
- 3.расчет\_режим

2

Необходимо ли охлаждение на промежуточном уровне?

- 1.да
- 2.нет

2

Какие удельные энергозатраты допустимы?

- 1.больше\_0.4\_КВт/Вт
- 2.0.4-0.3\_КВт/Вт
- 3.меньше\_0.3\_КВт/Вт

2

Я предлагаю СО с дросселем, согласны?

- 1.да
- 2.нет

1

Я предлагаю винтовой компрессор, согласны?

1.да

2.нет

1

Сосуд неизвестен.

Конец консультации.

Результат консультации:

выполнение=да, кд=100

Конец консультации

## ФАКТЫ БАЗЫ ЗНАНИЙ

переменная\_eps\_др=степень\_расширения\_в\_пром\_дресселе, оп=100

переменная\_T\_2\_т/о\_со=температура\_основного\_потока\_на\_выходе,  
оп=100

двухпоточный\_т/о\_ступени\_ожижения=один, оп=100

подогреватель=не\_нужен, оп=100

переменная\_T\_3\_т/о=не\_нужна, оп=100

трехпоточный\_т/о=не\_нужен, оп=100

модель\_3\_т/о=балансовые\_уравнения, оп=100

переменная\_T\_2\_т/о=температуры\_основного\_потока\_на\_выходах,  
оп=80

двухпоточный\_т/о=восемь, оп=80

модель\_2\_т/о=балансовые\_уравнения, оп=100

модель\_аз-гел\_т/о=балансовые\_уравнения, оп=100

переменная\_G\_аг\_т/о=расход\_гелия, оп=80

азотно-гелиевый\_т/о=один, оп=80

переменная\_G\_ав=расход\_азота, оп=80

азотная\_ванна=двухпоточная, оп=80,нужна, оп=80

переменная\_n\_т/д=не\_нужна, оп=100

переменная\_eps\_т/д=не\_нужна, оп=100

переменная\_G\_т/д=расходы\_в\_1\_и\_2\_ступенях, оп=100

смеситель\_потоков=четыре, оп=80

разделитель\_потоков=четыре, оп=80

переменная\_G\_к=не\_нужна, оп=100

переменная\_p\_к=давление\_после\_компрессора, оп=100

сосуд=, оп=100

нагнетатель=не\_нужен, оп=100

пром\_дресселирование=нужно, оп=100

ступень\_ожижения=с\_дресселем, оп=100

детандер=турбодетандер, оп=100

число\_ступеней=три, оп=100  
предв\_охлаждение=да, оп=80  
схема=параллельные\_детандеры, оп=100  
компрессор=винтовой, оп=100  
энергозатраты=большие, оп=100  
производительность=большая, оп=100  
модель\_т/д=проект\_расчет, оп=100  
энергозатр\_ож=Не определено  
энергозатр\_реф=0.4-0.3\_квт/вт, оп=100  
произв\_ож=50-250\_л/ч, оп=100  
произв\_реф=больше\_1000\_вт, оп=100  
выполнение=, оп=100  
задача=оптимизация\_схемы, оп=100  
давление=0.5-1\_мпа, оп=100  
надежность=повышенная, оп=100  
темп\_уровень=4.5к-4.7к, оп=100  
тип=комбинированная, оп=100  
запуск=, оп=100  
КОНЕЦ ФАКТОВ БАЗЫ ЗНАНИЙ

Соответствующая схема приведена на рис.6.3.

### **6.4. Автоматизация построения математических моделей КС**

Составление алгоритма расчета КС с данной технологической схемой на втором этапе проектирования может быть выполнено методом „ручной“ сборки схемы из элементов (модулей) единиц оборудования либо автоматически.

Метод „ручной“ сборки требовал создания для каждой схемы отдельной программы, предусматривающей вызов модулей, логическую связь между ними, передачу информации от модуля к модулю и организацию ввода-вывода. Очевидно, что этот метод малоэффективен при структурной оптимизации, когда необходимо провести анализ и выполнить расчеты разных схем КС, и требует затрат времени и труда высококвалифицированных специалистов при реализации и отладке соответствующих программ.

Поэтому, чтобы ускорить структурную оптимизацию схем, уменьшить трудоемкость подготовки программ и исходной информации для них, целесообразно применение метода автоматизированного построения моделей схем КС. Этот метод должен обеспечить быстрое формирование модели системы по заданному виду ее технологической (структурной) схемы.

Основой для автоматизации моделирования являются характерные особенности как КС, так и разработанного алгоритмического и программного обеспечения, позволившие формализовать большинство операций, необходимых при построении математических моделей и программ расчета. К ним относятся: четко выраженная схемная структура установок и систем; относительно небольшой набор типов элементов; модульный принцип реализации моделей элементов; наличие в схемах нескольких экземпляров одинаковых модулей; возможность стандартизации параметров подпрограмм моделей элементов; резервирование модулей (наличие нескольких взаимозаменяемых вариантов).

Входными и выходными переменными модулей являются характеристики материальных или тепловых потоков: расход, давление, температура, энтальпия. Число этих потоков в конкретных модулях, как правило, больше единицы. Поэтому удобно наборы векторов входных  $A$ , управляющих  $C$  и выходных  $B$  переменных (параметров) модулей представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} &A_1^k, A_2^k, \dots, A_l^k \\ &B_1^k, B_2^k, \dots, B_m^k \\ &C_1^k, C_2^k, \dots, C_n^k \end{aligned} \tag{6.20}$$

где

$$\begin{aligned} A_i^k &= (G_{11}^k, p_{11}^k, T_{11}^k, h_{11}^k), \quad i = 1, 2, \dots, l; \\ B_i^k &= (G_{12}^k, p_{12}^k, T_{12}^k, h_{12}^k), \quad i = 1, 2, \dots, m; \end{aligned}$$

индексы  $k$  - модуль;  $l$  - число входящих потоков;  $m$  - число выходящих потоков;  $n$  - число векторов управляющих параметров.

Управляющими параметрами модулей являются гидравлические сопротивления, притоки теплоты из окружающей среды, степени расширения в детандерах, дросселях, частоты вращения роторов турбодетандеров и др.

Информация о параметрах потоков во всех точках схемы размещается в матрице  $M(N, 4)$ , где  $N$  - число точек схемы. Тогда векторы входных и выходных параметров модулей задаются в виде сечений матрицы  $M$ ,

$$B_i^k = A_i^{k+1} = MI(i, *).$$

В результате анализа литературных источников, описывающих выпускаемые, разрабатываемые и перспективные КГУ, был выбран широкий класс технологических схем последних для создания универсальной моделирующей процедуры. Ее основой являлась условная структурная схема (УСС) и описанный способ представления информации. Конкретные структурные схемы КГУ образовались как частные случаи УСС.

Дальнейшим развитием этой технологии явились диалоговые средства (ДС), реализованные вначале на универсальных ЭВМ, а затем и на персональных, позволившие формировать математические модели КС в задачах оптимизации технологических схем и КРР без ограничений на вид структурной схемы.

Прежде, чем приступить к однократным расчетам схемы или оптимизации в постановке нелинейного программирования, необходимо создать последовательность поэлементного расчета схемы. На этом этапе ДС после запроса входных наборов данных со схемой КС, списками переменных и ограничений сами, посредством вызова специальной подпрограммы-анализатора входных данных, формируют последовательность расчета произвольной схемы.

Анализатор построен таким образом, что на основе применения заложенных в него логических моделей каждого из модулей, анализа данных о схеме КС и списка переменных, он генерирует и печатает последовательность вызова всех модулей КС при однократном расчете схемы, а также формирует дополнительные данные - управляющие параметры модулей. В процессе выполнения

вычислений последние позволяют определить, параметры какой точки схемы являются входными, а какой - выходными при каждом вызове модели конкретного модуля.

Если анализатор обнаруживает, что по всем имеющимся в его распоряжении данным и логическим правилам построение полной последовательности расчета схемы невозможно, то он тем не менее генерирует эту последовательность до тех пор, пока существует возможность рассчитать еще хоть один элемент КС. После этого выдается сообщение, что схема КС не работоспособна, выводится полный список элементов и параметров точек схемы, расчет которых можно выполнить по имеющимся данным и расчет которых невозможен.

Приведем в качестве примера листинг анализатора для схемы КГУ с двумя последовательными турбодетандерами (рис.6.1). Здесь в табл.6.1. дана информация о наличии начальных значений параметров, заданных в виде констант при формировании схемы или независимых переменных оптимизации. Далее приведена последовательность вычислений и вызова модулей при расчете схемы.

### **Последовательность вычислений:**

Расход в точке 2 по расходу в точке (точках) 1 31  
Расход в точке 3 по расходу в точке (точках) 2  
Расход в точке 17 по расходу в точке (точках) 16  
Расход в точке 32 по расходу в точке (точках) 31  
Расход в точке 4 по расходу в точке (точках) 32 3  
Расход в точке 5 по расходу в точке (точках) 4  
Расход в точке 6 по расходу в точке (точках) 5  
Расход в точке 7 по расходу в точке (точках) 6 27  
Расход в точке 8 по расходу в точке (точках) 7  
Расход в точке 9 по расходу в точке (точках) 8  
Расход в точке 10 по расходу в точке (точках) 9  
Расход в точке 11 по расходу в точке (точках) 10  
Расход в точке 12 по расходу в точке (точках) 11 16  
Расход в точке 13 по расходу в точке (точках) 12  
Расход в точке 14 по расходу в точке (точках) 13  
Расход в точке 15 по расходу в точке (точках) 14  
Расход в точке 18 по расходу в точке (точках) 15 17  
Расход в точке 34 по расходу в точке (точках) 33

Расход в точке 35 по расходу в точке (точках) 34

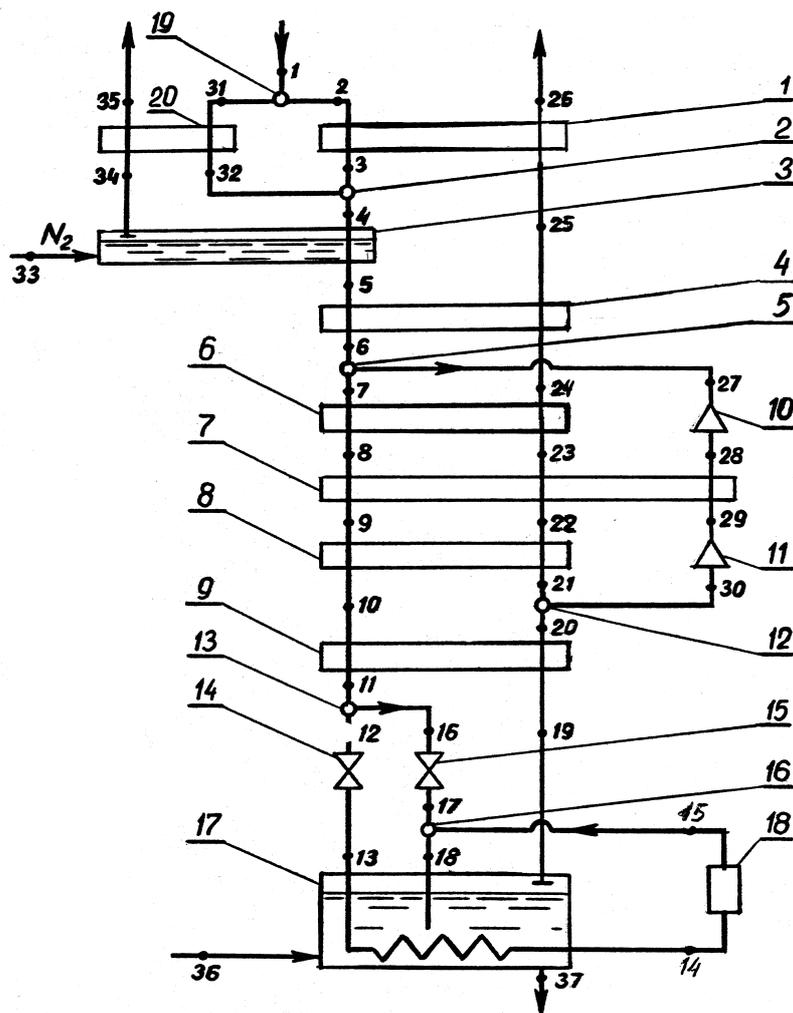


Рис.6.1. Структурная схема КГУ с двумя последовательными турбодетандерами

- Давление в точке 31 по давлению в точке 1
- Давление в точке 2 по давлению в точке 1
- Давление в точке 3 по давлению в точке 2
- Давление в точке 32 по давлению в точке 3
- Давление в точке 4 по давлению в точке 3
- Давление в точке 5 по давлению в точке 4
- Давление в точке 6 по давлению в точке 5
- Давление в точке 27 по давлению в точке 6
- Давление в точке 7 по давлению в точке 6
- Давление в точке 8 по давлению в точке 7
- Давление в точке 9 по давлению в точке 8
- Давление в точке 10 по давлению в точке 9
- Давление в точке 11 по давлению в точке 10
- Давление в точке 16 по давлению в точке 11
- Давление в точке 12 по давлению в точке 11

Давление в точке 15 по давлению в точке 14  
Давление в точке 17 по давлению в точке 15  
Давление в точке 18 по давлению в точке 15  
Давление в точке 20 по давлению в точке 19  
Давление в точке 30 по давлению в точке 20  
Давление в точке 21 по давлению в точке 20  
Давление в точке 22 по давлению в точке 21  
Давление в точке 23 по давлению в точке 22  
Давление в точке 24 по давлению в точке 23  
Давление в точке 25 по давлению в точке 24  
Давление в точке 26 по давлению в точке 25  
Давление в точке 28 по давлению в точке 27  
Давление в точке 29 по давлению в точке 28  
Давление в точке 35 по давлению в точке 34  
Давление в точке 13 по давлению в точке 14  
Элемент *N* 3  
Элемент *N* 2  
Элемент *N* 5  
Элемент *N* 10  
Элемент *N* 13  
Элемент *N* 19  
Элемент *N* 20  
Степень расширения элемента *N* 11  
Степень расширения элемента *N* 14  
Степень расширения элемента *N* 15  
Расход в точке 29 по расходу в точке (точках) 28  
Элемент *N* 11  
Элемент *N* 14  
Элемент *N* 15  
Элемент *N* 16  
Элемент *N* 17  
Элемент *N* 18  
Расход в точке 20 по расходу в точке (точках) 19  
Расход в точке 21 по расходу в точке (точках) 20 30  
Расход в точке 22 по расходу в точке (точках) 21  
Расход в точке 23 по расходу в точке (точках) 22  
Расход в точке 24 по расходу в точке (точках) 23  
Расход в точке 25 по расходу в точке (точках) 24  
Расход в точке 26 по расходу в точке (точках) 25  
Элемент *N* 9

Элемент  $N$  12

Температура в точке 8 по температуре в точке 28

из ограничения типа равенства номер 1

Температура в точке 9 по температуре в точке 29

из ограничения типа равенства номер 2

Элемент  $N$  8

Элемент  $N$  7

Элемент  $N$  6

Элемент  $N$  4

Элемент  $N$  1

Таблица 6.1

Информация о наличии начальных значений теплофизических параметров в точках схемы ( 1 - задан, 0 - не задан )

$N$	$G$	$p$	$T$	$h$	$N$	$G$	$p$	$T$	$h$
1	1	1	1	0	2	0	0	0	0
3	0	0	1	0	4	0	0	0	0
5	0	0	1	0	6	0	0	0	0
7	0	0	0	0	8	0	0	0	0
9	0	0	0	0	10	0	0	1	0
11	0	0	1	0	12	0	0	0	0
13	0	0	0	0	14	0	1	0	0
15	0	0	1	1	16	1	0	0	0
17	0	0	0	0	18	0	0	0	0
19	0	1	0	0	20	0	0	0	0
21	0	0	0	0	22	0	0	0	0
23	0	0	0	0	24	0	0	0	0
25	0	0	0	0	26	0	0	0	0
27	1	0	1	0	28	0	0	0	0
29	0	0	1	0	30	0	0	0	0
31	1	0	0	0	32	0	0	0	0
33	1	1	1	0	34	0	1	1	0
35	0	0	0	0	36	0	1	0	0
37	1	1	0	0					

Контроль включения всех модулей в полную последовательность расчета схемы завершается сообщением о „работоспособности“ схемы, т.е. о достаточности данных для выполнения однократного расчета. Если схема „не работоспособна“, по листингу анализатора можно определить, необходимы ли новые переменные, и какие

константы следует задать дополнительно, чтобы при следующем вызове анализатора могло быть выполнено построение полной последовательности расчета синтезируемой схемы КС.

На этапах однократного расчета схемы либо оптимизации в постановке (6.2) необходимо ввести входные наборы данных со схемой КС, списками переменных, ограничений и последовательностью поэлементного расчета схемы и выбрать целевую функцию в меню имеющихся. Необходимо также ввести с дисплея два массива, которые будут переданы подпрограмме оптимизации в качестве информационного и управляющего параметров.

Теперь вся необходимая информация задана и управление передается подпрограмме-интерпретатору, которая выполняет многократные расчеты схемы по последовательности, созданной анализатором, вызывая подпрограммы оптимизации. На каждой итерации подпрограмма оптимизации модифицирует переменные по соответствующему алгоритму, анализирует вектор невязок по ограничениям и текущие значения целевой функции.

Таким образом, расчетно-логическая диалоговая система искусственного интеллекта ДС ПМКС полностью автоматизирует проектные процедуры структурного и параметрического синтеза схем КС, оставляя инженеру решение творческих задач выбора технологических схем, анализа результатов и принятия решений.

### **6.5. Оптимизация КГУ с последовательным или параллельным включением турбодетандеров**

Рассмотрим конкретные постановки и результаты решения задач технологического проектирования, относящихся к 4-му классу. Задачи параметрической оптимизации схем КГУ с технологическим критерием эффективности в постановке общей задачи нелинейного программирования (6.2) содержали 12 - 20 переменных, среди которых давление и расход прямого потока, температуры перед ТД, степени расширения и частоты вращения роторов, неизвестные температуры в узловых точках схемы. Притоки теплоты и потери давления в теплообменниках считали заданными. Использовалась

технология автоматизации построения математических моделей КГУ, основанная на применении универсальной структурной схемы.

Для решения задач применялся метод параметризации целевой функции (6.10), (6.11) в сочетании с комплексным или симплексным поиском. Для нахождения локального экстремума при выполнении всех ограничений, как правило, было достаточно 2 - 3 итераций безусловной минимизации с 50 шагами в методах поиска.

Для КГУ с двумя последовательными ТД, структурная схема которой приведена на рис.6.2, целевая функция в рефрижераторном режиме -  $\max q = G_{15} (h_{15} - h_{14})$ , в ожижительном режиме  $\max G_{30}$ . Расход и температура поступающего гелия 59 г/с и 300 К соответственно. ТД моделировались по алгоритму 3.1 при значениях параметров, приведенных в 3.2.

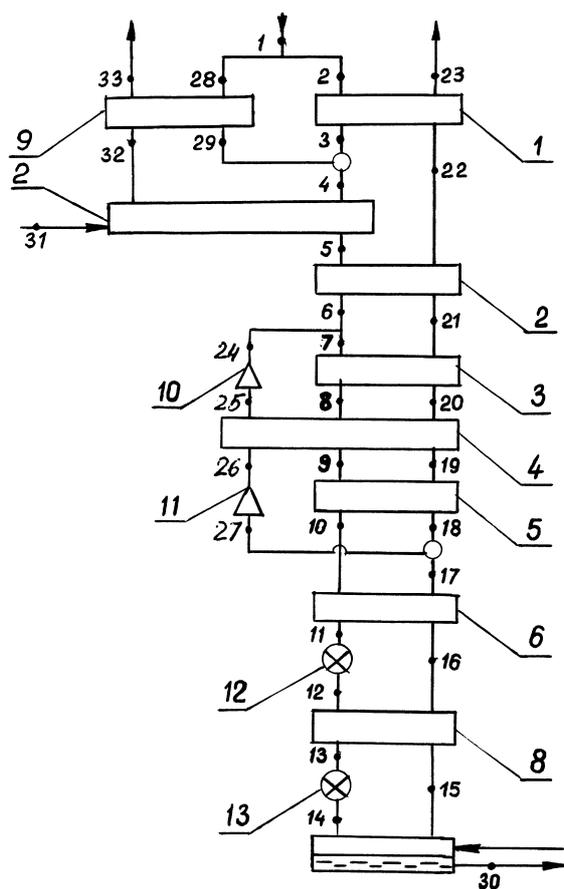


Рис.6.2. Структурная схема КГУ с двумя последовательными турбодетандерами

Анализ результатов оптимизации ожижительного и рефрижераторного режимов позволил отказаться от общепринятого допущения о равенстве температуры дроссельного потока на входе и выходе

трехпоточного теплообменника соответствующим температурам детандерного потока. Отметим, что в реальных режимах работы КГУ эти температуры также не равны.

Поиск максимума холодопроизводительности в рефрижераторном режиме с дросселем в СО привел в точку с  $q = 534$  Вт и выполнению всех ограничений. Удельные затраты энергии составили  $l^* = 332$  Вт/Вт. Для СО с жидкостным детандером в рефрижераторном режиме получена  $q = 627$  Вт при  $l^* = 283,4$  Вт/Вт. Последнему значению  $q$  соответствуют переменные:  $p_1 = 1,814$  МПа;  $T_{10} = 10,64$  К;  $T_{11} = 6,64$  К;  $T_{13} = 4,73$  К;  $T_{24} = 69,55$  К;  $T_{26} = 16,59$  К;  $\varepsilon_{dr13} = 0,3322$ ;  $\varepsilon_{d10} = 0,3694$ ;  $n_{d10} = 3613,8$  с<sup>-1</sup>;  $n_{d11} = 2727,7$  с<sup>-1</sup>;  $T_8 = 56,50$  К;  $T_9 = 18,84$  К. Детандерный поток составил 27 г/с, КПД турбодетандеров 0,565 и 0,766 для 1-й и 2-й ступеней соответственно.

Для СО с жидкостным детандером в жидкостном режиме получена оптимальная точка со значением целевой функции  $G = 8,22$  г/с; последнему значению при всех выполненных ограничениях соответствуют переменные  $p_1 = 2,29$  МПа;  $T_{10} = 12,18$  К;  $T_{11} = 9,94$  К;  $T_{13} = 9,10$  К;  $T_{24} = 47,41$  К;  $T_{26} = 17,54$  К;  $\varepsilon_{dr13} = 10,9829$ ;  $\varepsilon_{d10} = 0,4403$ ;  $n_{d10} = 3862$  с<sup>-1</sup>;  $n_{d11} = 2942$  с<sup>-1</sup>;  $T_8 = 38,66$  К;  $T_9 = 16,5$  К;  $G_{28} = 5,77$  г/с;  $G_{31} = 27,20$  г/с. Детандерный поток составил 40,77 г/с, КПД турбодетандеров 0,698 и 0,752 для 1-й и 2-й ступеней соответственно, удельные затраты энергии на получение жидкого гелия - 37680 кДж/кг.

Полученные результаты показали, что технологические критерии эффективности, представленные в виде (6.16) - многоэкстремальные функции в пространстве переменных  $A$ ,  $C$ . Параметрическая оптимизация позволила найти характеристики потоков в точках схемы КГУ, которым соответствуют значения  $K$ , существенно лучшие, чем при традиционной технологии проектирования.

Выполнены также расчеты КГУ большой производительности, структурная схема которой приведена на рис.6.3. Увеличение расхода циркулирующего гелия в 3-4 раза по сравнению с рассмотренной выше установкой позволило рассмотреть цикл с тремя ТД, установленными параллельно. Снижение давления в цикле позволяет весь перепад давления сработать в каждой из турбомашин, применить для сжатия гелия винтовые компрессорные агрегаты,

отказавшись от дожимающего компрессора. Расход и температура циркулирующего гелия 0,222 кг/с (два винтовых маслозаполненных компрессорных агрегата по 400 кг/ч каждый) и 300 К соответственно.

Поиск  $max q$  в рефрижераторном режиме привел в точку с  $q = 2214$  Вт при  $l^* = 329,3$  Вт/Вт. Этому значению целевой функции соответствуют переменные  $p_1 = 1,288$  МПа;  $T_5 = 125,12$  К;  $T_{11} = 47,35$  К;  $T_{14} = 8,57$  К;  $T_{15} = 6,55$  К;  $T_{17} = 5,39$  К;  $T_{32} = 167,8$  К;  $T_{34} = 63,26$  К;  $T_{36} = 19,15$  К;  $\varepsilon_{dr} = 0,5542$ ;  $n_{d12} = 4033$  с<sup>-1</sup>;  $n_{d13} = 2928$  с<sup>-1</sup>;  $n_{d14} = 3800$  с<sup>-1</sup>. КПД турбодетандеров составили 0,409; 0,479; 0,729, детандерные потоки 17,12 г/с; 27,20 г/с; 48,15 г/с для 1-й, 2-й и 3-й ступеней соответственно.

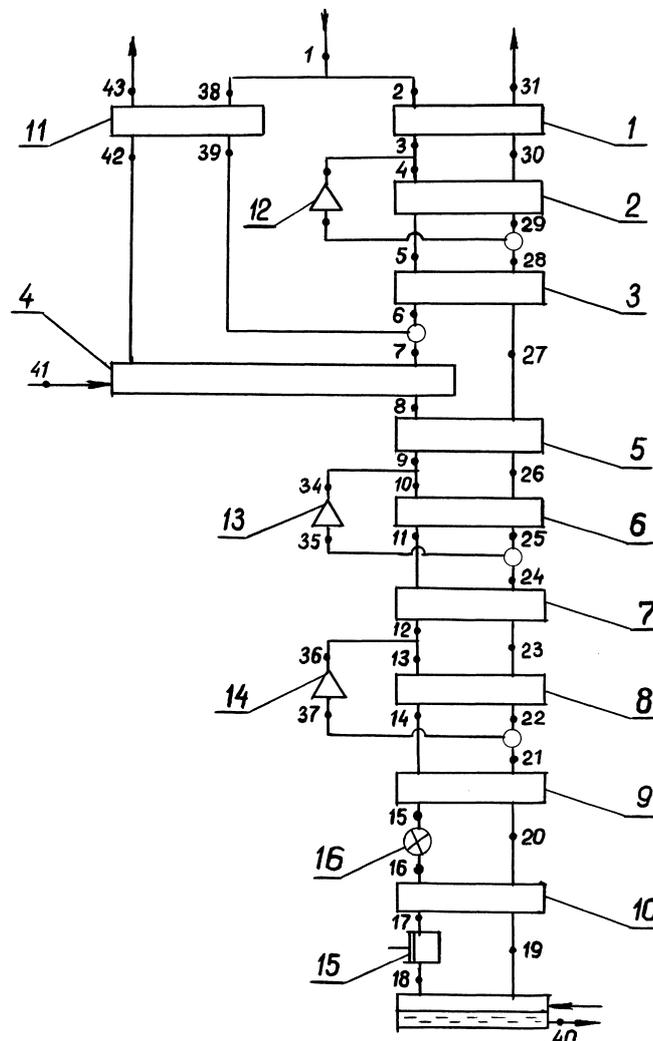


Рис.6.3. Структурная схема КГУ с тремя параллельными турбодетандерами

Поиск оптимального решения для ожижительного режима привел в точку со значением  $max G = 12,7$  г/с, которому соответствуют переменные  $p_1 = 1,118$  МПа;  $T_5 = 119,29$  К;  $T_{11} = 31,41$  К;

$T_{14} = 10,78$  К;  $T_{15} = 9,81$  К;  $T_{17} = 8,9$  К;  $T_{32} = 162,35$  К;  $T_{34} = 50,65$  К;  $T_{36} = 20,30$  К;  $\varepsilon_{dr} = 1,0$ ;  $n_{d12} = 4077$  с<sup>-1</sup>;  $n_{d13} = 3875$  с<sup>-1</sup>;  $n_{d14} = 3268$  с<sup>-1</sup>;  $G_{38} = 16,14$  г/с;  $G_{41} = 77,12$  г/с;  $T_6 = 93,41$  К. КПД турбодетандеров составили 0,431; 0,644; 0,753, детандерные потоки 15,09 г/с; 25,45 г/с; 39,19 г/с для 1-й, 2-й и 3-й ступеней соответственно; доля жидкости 0,089, удельные затраты энергии на получение жидкого гелия - 80554 кДж/кг.

Относительно небольшие КПД турбодетандеров 1-й и 2-й ступеней расширения объясняются применением машин, спроектированных на другие условия работы. Несмотря на повышенные удельные затраты энергии, достоинством цикла является низкое давление прямого потока гелия и, следовательно, возможность применения пластинчато-ребристых теплообменников.

К КГУ, предназначенным для систем охлаждения сверхпроводящих устройств, предъявляются требования низких удельных затрат энергии в рефрижераторных режимах (не более 300 Вт/Вт), возможности эффективной работы в различных режимах, высокой надежности (время непрерывной работы должно быть не менее 8000 ч). Этим требованиям отвечает установка, работающая по схеме с тремя последовательными ТД и жидкостным детандером в СО (КГУ-1600/4,5). Три установки образовывали КС сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер Нуклотрона в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне.

Параметрическая оптимизация технологической схемы такой установки, содержащая 18 - 20 переменных и 25 - 28 ограничений типа неравенств, позволяет существенно улучшить ее энергетические характеристики по сравнению с проектными.

Поиск максимума холодопроизводительности в рефрижераторном режиме при расходе циркулирующего гелия 600 кг/ч привел в точку со значением  $q = 2257$  Вт и выполнению всех ограничений, удельные затраты энергии составили 220,2 Вт/Вт. Поиск оптимального решения для ожижительного режима привел в точку со значением целевой функции 20,4 г/с (587 л/ч), которой соответствуют удельные затраты энергии на получение жидкого гелия 1,68 кВтч/л.

Как и в предшествующих расчетах, технологические критерии эффективности имели несколько локальных экстремумов. Оптимальное давление прямого потока в режиме с максимальной холодопроизводительностью составляет 1,82 МПа, частоты вращения роторов ТД - 1656 - 2221 с<sup>-1</sup>. ТД моделировались по алгоритму, приведенному в 3.2, значения режимных параметров определены на основе опытных данных по результатам эксплуатации установки КГУ-1600/4,5.

Применение более эффективных ТД позволяет повысить расчетную производительность установки до  $\max q = 2550 \text{ Вт}$  ( $l^* = 195,3 \text{ Вт/Вт}$ ) в рефрижераторном и  $\max G_{48} = 21,06 \text{ г/с}$  (607 л/ч,  $l^* = 1,37 \text{ кВтч/л}$ ) в ожижительном.

Применение в СО криогенного нагнетателя для понижения температурного уровня работы в рефрижераторном режиме приводит к задаче с векторным критерием оптимальности,

$$\max q(x); \min T_{22}(x).$$

Используя преобразования

$$q^0(x) = q(x) / q_{\max}; T^0(x) = T(x) / T_{\max},$$

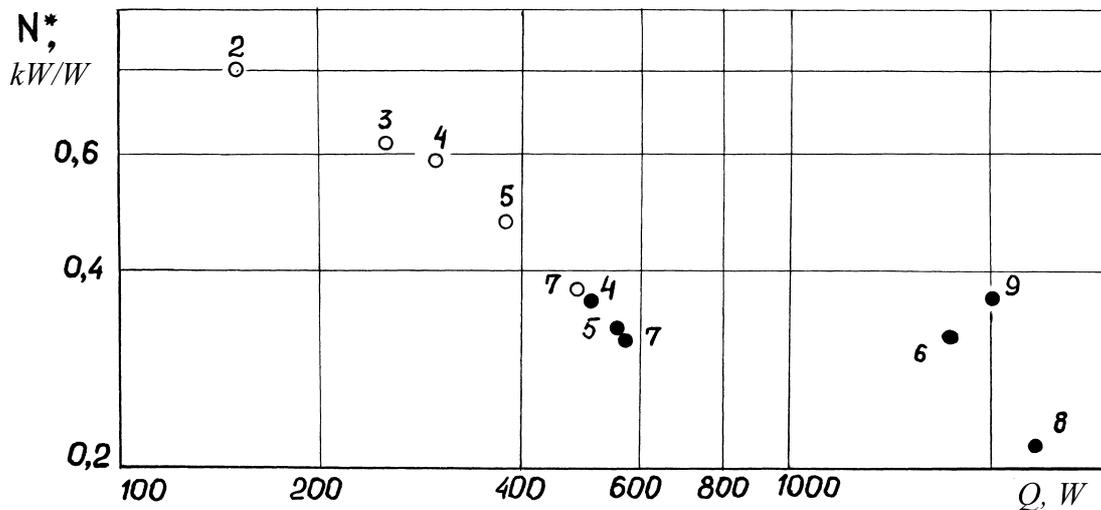
в соответствии с выражением (6.14) обобщенный критерий получим в виде

$$\min \Phi(x) = T^0(x) / q^0(x). \quad (6.21)$$

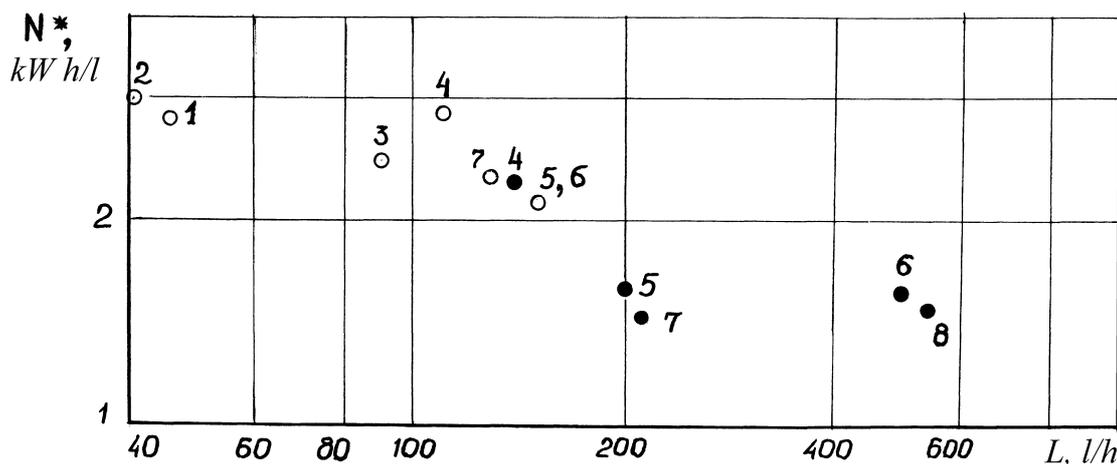
Модель криогенного нагнетателя (3.28) потребовала введения дополнительных переменных - диаметра колеса и числа Маха, двусторонних ограничений на переменные, частоту вращения ротора машины, функцию  $\varphi$ . Поиск минимума критерия (6.21) привел в точку со значением  $\Phi(x) = 1,0366$ , которому соответствуют  $\max q(x) = 1,811 \text{ кВт}$ ,  $\min T_{22}(x) = 3,67 \text{ К}$  при  $q_{\max} = 2,3 \text{ кВт}$ ,  $T_{\max} = 4,5 \text{ К}$ .

На рис.6.4 показана зависимость удельных затрат энергии от производительности ряда КГУ. Можно полагать, что значения  $l^*$ , соответствующие результатам оптимизации цикла с тремя последова-

тельными ТД, являются предельно достижимыми для рассмотренного класса технологических схем.



a)



b)

Рис.6.4. Зависимость удельных затрат энергии от производительности КГУ:

а) - в рефрижераторных режимах работы; б) - в оживительных режимах работы; 1 - Г-45; 2 - КГУ-150; 3 - КГУ-250; 4 - КГУ-500; 5 - КГУ-500-200; 6 - КГУ-1600; 7 - КГУ с двумя последовательными турбодетандерами; 8 - КГУ с тремя последовательными турбодетандерами; 9 - КГУ с тремя параллельными турбодетандерами; о - с дросселем; • - с жидкостным детандером

Рассмотрим теперь более детально несколько задач, решенных с помощью ДС. Для тестирования ДС была выбрана одна из наиболее распространенных схем КГУ с двумя последовательными ТД и предварительным азотным охлаждением (рис.6.2). Расчеты выполнены при следующих исходных данных: холодопроизводительность в рефрижераторном режиме работы 6 кВт; массовый расход

циркулирующего гелия 1 кг/с; притоки теплоты в теплообменниках и холодные утечки в ТД отсутствуют; изоэнтروпийные КПД детандеров 0,7; гидравлическое сопротивление нагрузки 18 составляет 0,2 МПа. Задача содержит 12 переменных и 19 ограничений типа равенств и неравенств. Целевая функция

$$\min l^* = L / Q_0, \quad (6.22)$$

где  $L = 2,07732 T_1 G_1 \ln(p_1 / p_{26}) / \eta_k + L_a G_{33}$ ;  $Q_0 = G_{15} (h_{15} - h_{14})$ ;  
 $T_1 = 300$  К;  $\eta_k = 0,6$ ;  $L_a$  - затраты энергии на производство жидкого азота,  $L_a = 4320$  кДж/кг.

Независимые переменные: энтальпия и температуры в узловых точках схемы  $x_1 = h_{15}$ ,  $x_2 = T_{11}$ ,  $x_5 = T_{27}$ ,  $x_6 = T_{29}$ ,  $x_8 = T_{10}$ ,  $x_{12} = T_{32}$ ; давление после компрессора  $x_9 = p_1$ ; массовые расходы, потоков  $x_3 = G_{16}$ ,  $x_4 = G_{27}$ ,  $x_{10} = G_{31}$ ,  $x_{11} = G_{33}$ ; степень расширения в ТД 1-й ступени  $x_7 = \varepsilon_{10} = p_{28} / p_{27}$ .

Ограничения типа равенств:

$$\begin{aligned} g_1(x) &= T_8 - T_{28} = 0; & g_4(x) &= G_{36} = 0; \\ g_2(x) &= T_9 - T_{29} = 0; & g_5(x) &= T_{32} - T_4 = 0. \\ g_3(x) &= Q_0 - 6,0 = 0; \end{aligned} \quad (6.23)$$

Здесь равенства  $g_1(x)$ ,  $g_2(x)$  придают одинаковые значения температурам двух прямых потоков на входах трехпоточных теплообменников. Это позволяет определить из ограничений типа равенств величины, не приведенные в списке переменных, и тем самым уменьшить число независимых переменных задачи.

Ограничения типа неравенств:

$$\begin{aligned} h_1(x) &= T_{11} - T_{19} - c_1 > 0; & h_7(x) &= T_5 - T_{25} - c_1 > 0; \\ h_2(x) &= T_{10} - T_{20} - c_1 > 0; & h_8(x) &= T_3 - T_{25} - c_2 > 0; \\ h_3(x) &= T_{10} - T_{21} - c_1 > 0; & h_9(x) &= T_2 - T_{26} - c_1 > 0; \end{aligned}$$

$$h_4(x) = T_9 - T_{22} - c_1 > 0; \quad h_{10}(x) = T_{32} - T_{34} - c_1 > 0; \quad (6.24)$$

$$h_5(x) = T_8 - T_{23} - c_1 > 0; \quad h_{11}(x) = T_{31} - T_{35} - c_1 > 0;$$

$$h_6(x) = T_7 - T_{24} - c_1 > 0; \quad h_{12}(x) = T_{10} - T_{11} - c_2 > 0;$$

$$h_{13}(x) = T_9 - T_{10} - c_2 > 0; \quad h_{14}(x) = G_{16} > 0,$$

где  $c_1, c_2$  - константы,  $c_1 = 0,2$ ;  $c_2 = 0,1$ .

Неравенства  $h_1(x) - h_{11}(x)$  представляют собой односторонние ограничения на температуры обратных потоков с учетом допустимой их разности на теплых концах теплообменников. Неравенства  $h_{12}(x), h_{13}(x)$  введены для учета возможной ошибки при неудачном выборе начального приближения. При оптимизационных расчетах эти неравенства контролируют охлаждение прямого потока при работе модулей теплообменников. Одному из результатов расчетов соответствуют следующие значения переменных:  $h_{15} = 20,86$  кДж/кг;  $T_{11} = 6,01$  К;  $T_{27} = 30,9$  К;  $T_{29} = 15,6$  К;  $T_{10} = 9,76$  К;  $T_{32} = 80,5$  К;  $p_1 = 1,5$  Мпа;  $G_{16} = 0$ ;  $G_{27} = 0,37$  кг/с;  $G_{33} = 0$ ;  $\varepsilon_{10} = 0,344$  и целевой функции  $l^* = 475$  кВт/кВт.

В проекте системы криогенного обеспечения международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР [71] суммарная холодопроизводительность на температурном уровне 4,5 К должна была составить 120 кВт, 80 К - 400 кВт, 20 К - 20 кВт. Из учета суммарной нагрузки на каждом из температурных уровней определяется количество рефрижераторов принятой единичной мощности 20 кВт. В связи с этим выполнены расчеты одноконтурной схемы (рис.6.5) и двухконтурной схемы (рис.6.6) для нескольких вариантов СО: с дросселем или жидкостным детандером (температурный уровень криостатирования 4,5 К), с жидкостным детандером и криогенным нагнетателем (температурный уровень 3,6 К) (рис.6.7).

Задача выбора оптимальных параметров КГУ с тремя последовательными ТД и жидкостным детандером (рис.6.5) в постановке (6.2) содержит 16 переменных и 27 ограничений типа равенств и неравенств. В расчетах учтены потери давления в теплообменниках, а холодные утечки в ТД и притоки теплоты в теплообменниках

приняты равными нулю. Изотермический КПД компрессора 0,6, изоэнтропийный КПД жидкостного детандера 0,8. Для моделирования ТД 11, 12, 13 использована первая модель из 3.1.

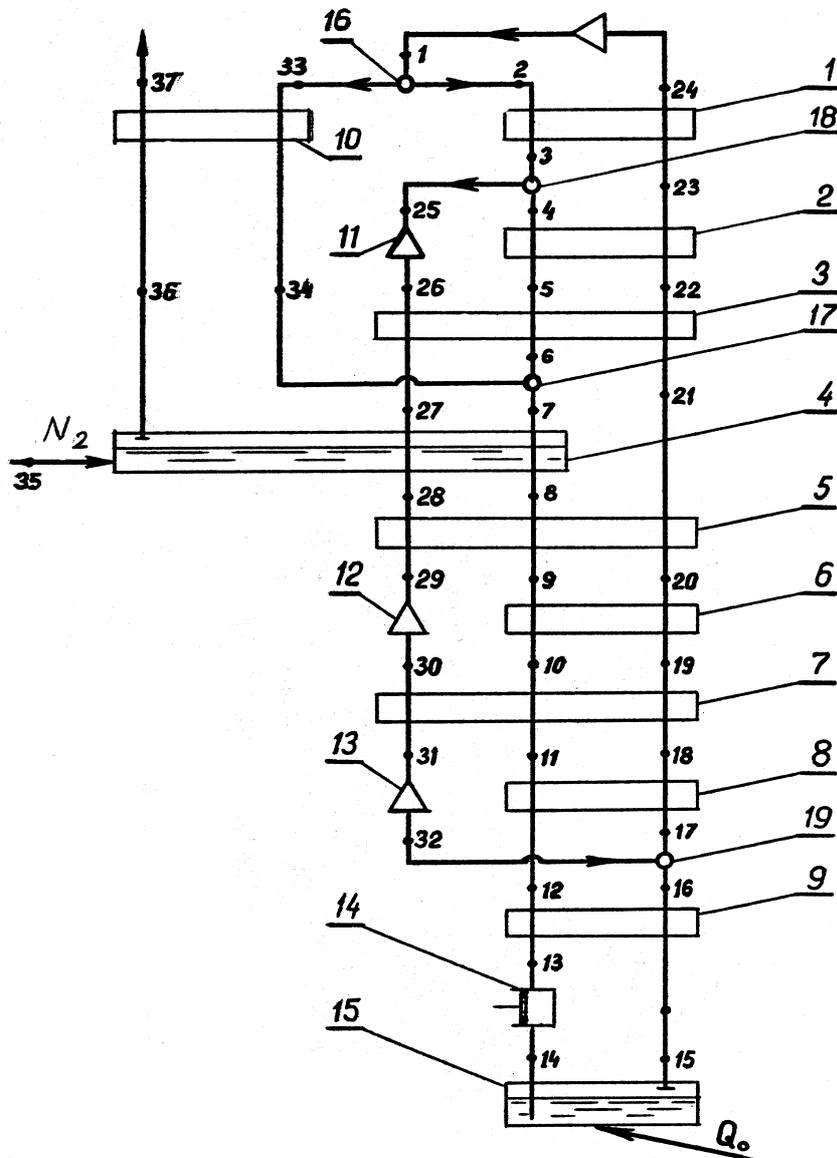


Рис.6.5. Структурная схема КГУ с тремя последовательными турбодетандерами

Независимыми переменными являются: давление после компрессора  $x_1 = p_1$ ; температуры в узловых точках схемы  $x_2 = T_3$ ,  $x_3 = T_5$ ,  $x_4 = T_6$ ,  $x_5 = T_{28}$ ,  $x_6 = T_{29}$ ,  $x_7 = T_{10}$ ,  $x_8 = T_{31}$ ,  $x_9 = T_{12}$ ,  $x_{10} = T_{13}$ ; степени расширения в ТД 1-й и 2-й ступеней  $x_{11} = p_{26} / p_{25}$ ,  $x_{12} = p_{30} / p_{29}$ , массовые расходы потоков  $x_{13} = G_1$ ,  $x_{14} = G_{25}$ ,  $x_{15} = G_{33}$ ,  $x_{16} = G_{35}$ .

Целевая функция

$$\min l^* = L / Q_0, \quad (6.25)$$

где  $L = 2,07732 T_1 G_1 \ln(p_1/p_{24})\eta_k + L_a G_3$ ;  $Q_0 = G_{15} (h_{15} - h_{14})$ .

Ограничения типа равенств:

$$\begin{aligned} g_1(x) &= d_1 (h_{15} - 30,268) = 0; & g_5(x) &= T_{28} - T_8 = 0; \\ g_2(x) &= d_2 (G_{25} - G_{31}) = 0; & g_6(x) &= T_{29} - T_9 = 0; \\ g_3(x) &= d_2(G_{25} - G_{31}) = 0; & g_7(x) &= T_{31} - T_{11} = 0; \\ g_4(x) &= T_6 - T_{34} = 0, \end{aligned} \quad (6.26)$$

где  $d_1, d_2$  - константы,  $d_1 = 10$ ;  $d_2 = 100$ .

Здесь ограничение  $g_1(x)$  введено, чтобы обеспечить совпадение энтальпии  $h_{12}$ , рассчитанной в подпрограмме подогревателя 15, с ее заданным значением на кривой насыщения при давлении  $p_{12} = 0,13$  МПа. Ограничения  $g_2(x), g_3(x)$  необходимы для совпадения расчетных значений массовых расходов в ТД.

Равенства  $g_4(x) - g_7(x)$  придают одинаковые значения температурам прямых потоков на входах (выходах) теплообменников. Эти выражения позволили уменьшить число независимых переменных задачи с 20 до 16, т.к. в ДС можно определить из ограничений типа равенств величины, не приведенные в списке переменных.

Ограничения типа неравенств:

$$\begin{aligned} h_1(x) &= aT_{12} - T_{16} > 0; & h_{13}(x) &= T_{24} - T_1 + c_1 > 0; \\ h_2(x) &= aT_{12} - T_{17} > 0; & h_{14}(x) &= T_{37} - T_{33} + c_1 > 0; \\ h_3(x) &= aT_{31} - T_{18} > 0; & h_{15}(x) &= T_{12} - T_{13} - c_2 > 0; \\ h_4(x) &= aT_{30} - T_{19} > 0; & h_{16}(x) &= T_{11} - T_{12} - c_2 > 0; \\ h_5(x) &= aT_{10} - T_{19} > 0; & h_{17}(x) &= T_{30} - T_{31} - c_2 > 0; \end{aligned} \quad (6.27)$$

$$\begin{aligned}
 h_6(x) &= aT_{29} - T_{20} > 0; & h_{18}(x) &= T_{10} - T_{11} - c_2 > 0; \\
 h_7(x) &= aT_{28} - T_{21} > 0; & h_{19}(x) &= T_9 - T_{10} - c_2 > 0; \\
 h_8(x) &= aT_{26} - T_{22} > 0; & h_{20}(x) &= T_8 - T_9 - c_2 > 0; \\
 h_9(x) &= aT_5 - T_{22} > 0; & h_{21}(x) &= T_7 - T_8 - c_2 > 0; \\
 h_{10}(x) &= aT_3 - T_{23} > 0; & h_{22}(x) &= T_{27} - T_{28} - c_3 > 0; \\
 h_{11}(x) &= aT_1 - T_{24} > 0; & h_{23}(x) &= T_{26} - T_{27} - c_2 > 0; \\
 h_{12}(x) &= aT_{23} - T_{37} > 0; & h_{24}(x) &= T_5 - T_6 - c_2 > 0; \\
 h_{25}(x) &= T_7 - T_{36} - c_2 > 0; \\
 h_{26}(x) &= T_{27} - T_{36} - c_2 > 0; \\
 h_{27}(x) &= T_{27} - T_{21} - c_2 > 0,
 \end{aligned}$$

где  $a, c_1, c_2, c_3$  - постоянные коэффициенты,  $a = 0,98$ ;  $c_1 = 10$ ;  $c_2 = 2$ ;  $c_3 = 0,1$ .

Для решения задачи (6.27)-(6.27) применялся метод параметризации целевой функции в сочетании с комплексным поиском. Для нахождения экстремума при выполнении всех ограничений с приемлемой точностью было достаточно 2-х итераций безусловной минимизации с 50 шагами в методе поиска.

Минимальному значению удельных затрат энергии  $l^* = 225$  кВт/кВт соответствуют значения переменных:  $p_1 = 1,8$  МПа;  $T_3 = 147,4$  К;  $T_5 = 131$  К;  $T_6 = 81,1$  К;  $T_{28} = 80,8$  К;  $T_{29} = 39,9$  К;  $T_{10} = 32,7$  К;  $T_{31} = 21,2$  К;  $T_{12} = 14,8$  К;  $T_{13} = 5,42$  К;  $\varepsilon_{11} = 0,6689$ ;  $\varepsilon_{12} = 0,5014$ ;  $G_1 = 1,508$  кг/с;  $G_{25} = 0,401$  кг/с;  $G_{33} = 0,00394$  кг/с;  $G_{35} = 0,020$  кг/с при КПД всех турбодетандеров  $\eta_s \approx 0,75$ .

Задача выбора оптимальных параметров двухконтурной схемы (рис.6.6) в постановке (6.2) содержит 13-15 переменных и 39 - 47 ограничений типа равенств и неравенств. В расчетах учтены потери давления в теплообменниках, а холодные утечки в ТД и притоки

теплоты в теплообменниках приняты равными нулю. Изотермический КПД компрессора 0,6, изоэнтروпийный КПД жидкостного детандера 0,8. Наружные диаметры колес прототипов ТД выбраны таким образом, чтобы при использовании второй модели из 3.1 расчетные значения изоэнтропийных КПД были близки к КПД прототипов, принятых равными 0,75.

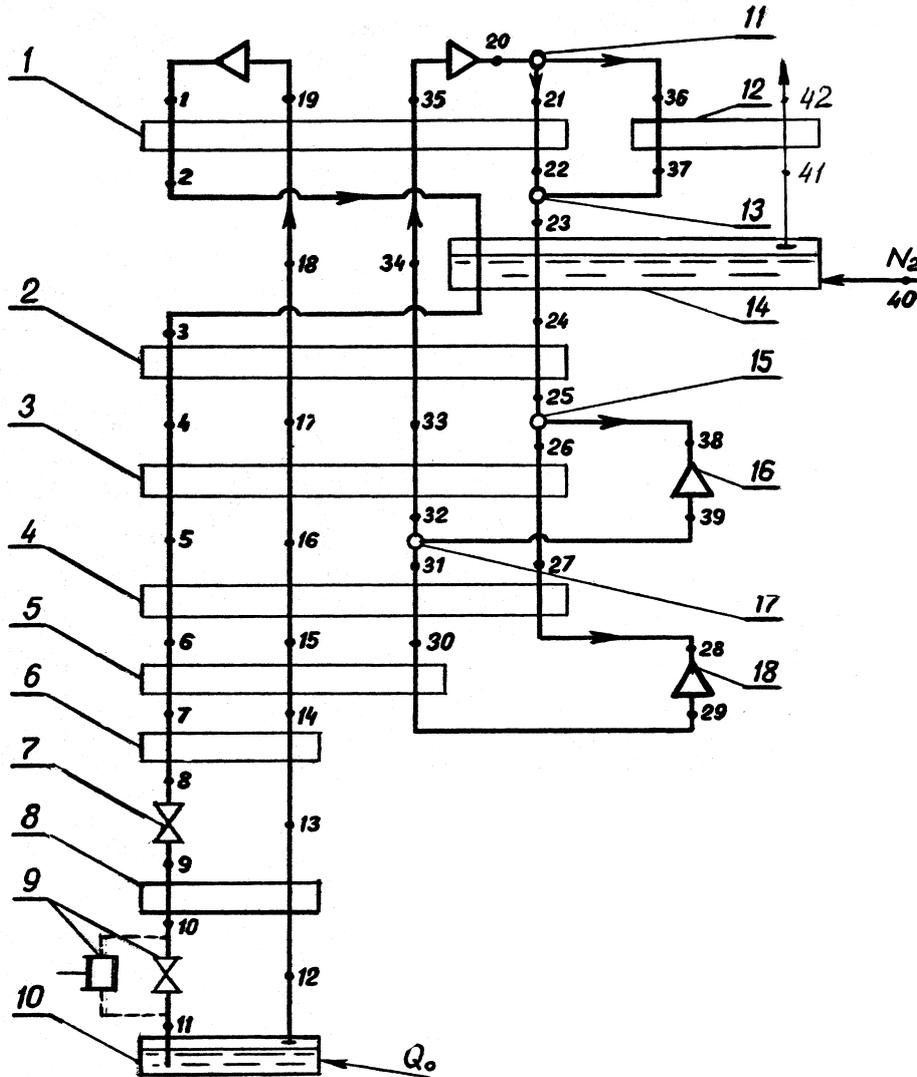


Рис.6.6. Структурная схема двухконтурной КТУ

В качестве независимых переменных приняты: температуры в узловых точках схемы  $x_1 = T_{24}$ ,  $x_2 = T_{25}$ ,  $x_3 = T_{27}$ ,  $x_4 = T_{28}$ ,  $x_5 = T_7$ ,  $x_6 = T_8$ ,  $x_7 = T_{10}$ ; степень расширения в дросселе  $x_8 = p_9 / p_8$ ; массовые расходы потоков  $x_9 = G_1$ ,  $x_{10} = G_{28}$ ,  $x_{11} = G_{40}$ ,  $x_{12} = G_{36}$ ,  $x_{13} = G_{38}$ .

Целевая функция

$$\min l^* = L / Q_0, \tag{6.28}$$

где

$$L = 2,07732 T_1 [G_1 \ln(p_1/p_{19}) + G_{20} \ln(p_{20}/p_{35})]/\eta_k + L_a G_{40};$$

$$Q_0 = G_{12} (h_{12} - h_{11}).$$

Ограничения типа равенств:

$$\begin{aligned} g_1(x) &= h_{12} - 30,268 = 0; & g_7(x) &= a_2 T_{28} - T_{30} = 0; \\ g_2(x) &= a_1 T_{37} - T_{41} = 0; & g_8(x) &= T_{25} - T_4 = 0; \\ g_3(x) &= a_1 T_{23} - T_{41} = 0; & g_9(x) &= T_{27} - T_5 = 0; \\ g_4(x) &= a_4 T_{24} - T_{34} = 0; & g_{10}(x) &= T_{28} - T_6 = 0; \\ g_5(x) &= a_2 T_{25} - T_{33} = 0; & g_{11}(x) &= T_{24} - T_3 = 0, \\ g_6(x) &= a_2 T_{27} - T_{31} = 0; \end{aligned} \quad (6.29)$$

где  $a_1, a_2$  - константы,  $a_1 = 0,96$ ;  $a_2 = 0,98$ .

Здесь ограничение  $g_1(x)$  выбрано для совпадения энтальпии  $h_{12}$ , рассчитанной в подпрограмме подогревателя 10, с ее заданным значением на кривой насыщения при давлении  $p = 0,13$  МПа. Равенства  $g_2(x) - g_7(x)$  устанавливают связь между температурами прямых и обратных потоков с учетом минимально допустимой их разности на теплом конце теплообменников.

Аналогично выражениям (6.26) равенства  $g_8(x) - g_{11}(x)$  придают одинаковые значения температурам прямых потоков на входах многопоточных теплообменников. Эти выражения позволили уменьшить число независимых переменных задачи с 23 до 13 с помощью определения из ограничений типа равенств величин, не приведенных в списке переменных.

Ограничения типа неравенств:

$$h_1(x) = a_1 T_{36} - T_{42} > 0; \quad h_{15}(x) = T_7 - T_8 - c_1 > 0;$$

$$\begin{aligned}
 h_2(x) &= a_1 T_1 - T_{19} > 0; & h_{16}(x) &= T_6 - T_7 - c_1 > 0; \\
 h_3(x) &= a_1 T_2 - T_{34} > 0; & h_{17}(x) &= T_5 - T_6 - c_1 > 0; \\
 h_4(x) &= a_1 T_3 - T_{18} > 0; & h_{18}(x) &= T_4 - T_5 - c_1 > 0; & (6.30) \\
 h_5(x) &= a_1 T_4 - T_{17} > 0; & h_{19}(x) &= T_3 - T_4 - c_1 > 0; \\
 h_6(x) &= a_1 T_5 - T_{16} > 0; & h_{20}(x) &= T_{15} - T_6 + c_2 > 0; \\
 h_7(x) &= a_1 T_{27} - T_{32} > 0; & h_{21}(x) &= T_{16} - T_5 + c_2 > 0; \\
 h_8(x) &= a_1 T_5 - T_{32} > 0; & h_{22}(x) &= T_{17} - T_4 + c_2 > 0; \\
 h_9(x) &= a_1 T_6 - T_{15} > 0; & h_{23}(x) &= T_{18} - T_3 + c_2 > 0; \\
 h_{10}(x) &= a_1 T_7 - T_{14} > 0; & h_{24}(x) &= T_{19} - T_1 + c_3 > 0; \\
 h_{11}(x) &= a_1 T_7 - T_{29} > 0; & h_{25}(x) &= T_{42} - T_{36} + c_3 > 0; \\
 h_{12}(x) &= a_1 T_8 - T_{13} > 0; & h_{26}(x) &= T_3 - 80 > 0; \\
 h_{13}(x) &= a_1 T_9 - T_{13} > 0; & h_{27}(x) &= T_2 - T_3 - c_4 > 0; \\
 h_{14}(x) &= T_9 - T_{10} - 0,4 > 0; & h_{28}(x) &= T_{23} - T_{24} - c_4 > 0.
 \end{aligned}$$

Здесь  $a_1, c_1, c_2, c_3, c_4$  - постоянные коэффициенты,  $a_1 = 0,98$ ;  $c_1 = 2$ ;  $c_2 = 6$ ;  $c_3 = 10$ ;  $c_4 = 1$ .

Так же, как в (6.24), неравенства  $h_1(x) - h_{13}(x)$ ,  $h_{24}(x)$ ,  $h_{25}(x)$  представляют собой односторонние ограничения на температуры обратных потоков с учетом допустимой их разности на теплых концах теплообменников. Неравенства  $h_{14}(x) - h_{23}(x)$ ,  $h_{26}(x) - h_{28}(x)$  введены для контроля случайных ошибок при неудачном выборе начального приближения.

При расчетах схемы с криогенным нагнетателем в СО (рис.6.7) дополнительно вводятся переменные  $x_{14} = D$  и  $x_{15} = M_u$ , ограничение типа равенства

$$g_{12}(x) = 10(p_{11} - p_{12}) = 0.$$

Дополнительные ограничения типа неравенств:

$$h_{17}(x) = 0,98 T_{10} - T_{43} > 0; \quad h_{29}(x) = n - 10^4 > 0;$$

$$h_{30}(x) = 10^5 - n > 0; \quad h_{31}(x) = M_u - 0,6 > 0;$$

$$h_{32}(x) = \varphi - 0,055 > 0; \quad h_{33}(x) = 0,915 - M_u > 0;$$

$$h_{34}(x) = 0,1 - \varphi > 0.$$

Результаты решения задач (6.28)-(6.30), (6.28)-(6.31) приведены в табл.6.2.

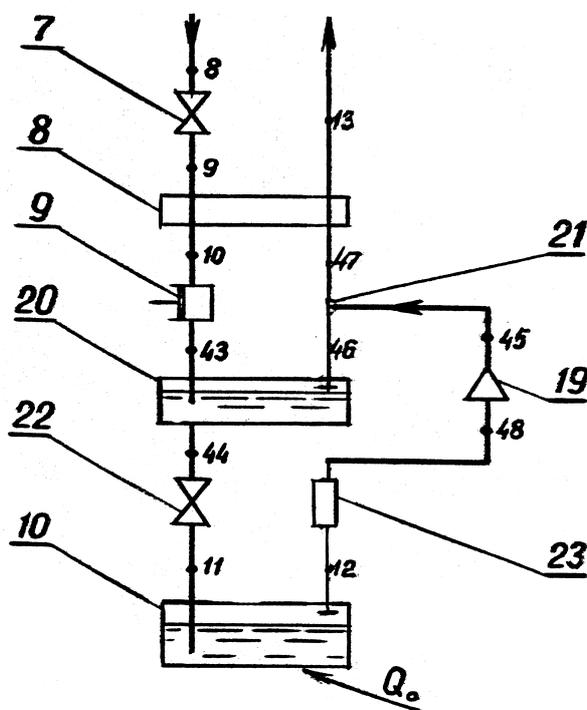


Рис.6.7. Схема СО с криогенным нагнетателем

Также выполнены расчеты двухконтурной КГУ с дросселем в СО на температурный уровень 4,5 К при холодопроизводительности 30 кВт. Для сопоставимости результатов расчетов с данными проекта [71] потери давления в теплообменниках приняты равными нулю, изотермический КПД компрессора 0,65, изоэнтروпийные КПД детандеров 0,75, температура окружающей среды 307 К. Независимые переменные, целевая функция и ограничения те же, что в выражениях (6.28) - (6.30). Результаты также приведены в табл.6.2.

Результаты расчета двухконтурных схем КГУ с различными СО

Величина	СО с дросселем	СО с жидк.детандером	СО с жидк. детандером и нагнетателем	СО с дросселем
$Q_0$ , кВт	20,0	20,0	20,0	30,0
$p_1$ , МПа	1,8	1,8	1,8	1,8
$p_{20}$ , МПа	2,5	2,5	1,8	1,8
$p_{35}$ , МПа	0,7	0,7	0,3	0,3
$T_{24}$ , К	80,86	80,07	80,73	81,40
$T_{25}$ , К	55,52	56,19	40,13	49,90
$T_{27}$ , К	39,90	39,22	24,63	32,40
$T_{28}$ , К	15,88	17,28	15,14	17,60
$T_7$ , К	11,26	12,10	9,15	11,00
$T_8$ , К	7,05	7,28	7,08	6,50
$T_{10}$ , К	4,96	5,24	6,02	4,90
$\varepsilon_7$	0,295	0,320	0,311	0,303
$G_1$ , кг/с	1,253	1,170	1,648	1,880
$G_{20}$ , кг/с	1,657	1,548	1,230	1,590
$G_{40}$ , кг/с	0,247	0,253	0,182	0,154
$G_{36}$ , кг/с	0,049	0,050	0,036	0,031
$G_{38}$ , кг/с	0,260	0,150	0,352	0,590
$D$ , м	-	-	0,141	-
$M_u$	-	-	0,913	-
$l$ , кВт/кВт	348	330	397	292

Полученные результаты непосредственно подтверждают возможность существенного улучшения энергетических показателей КГУ, повышения качества проектируемых установок при помощи методов оптимального проектирования.