

УДК 62-98

Метод оптимизации рабочих параметров комбинированных циклов ожижения гелия

Нагимов Р.Р., студент

*кафедра «Холодильная, криогенная техника,
системы кондиционирования и жизнеобеспечения»
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Навасардян Е.С., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
crio@power.bmstu.ru*

1. Введение

Основным направлением развития установок ожижения и криогенного разделения газов в последние годы является снижение энергетических затрат на производство криогенной продукции. Наряду с применением более совершенных аппаратов и агрегатов криогенной техники возможно повышение энергетической эффективности криогенных установок путем правильного выбора параметров криогенного цикла, применяемого в данных установках. Типичным примером подобной оптимизации является выбор оптимального значения детандерного потока в циклах ожижения гелия. Так, известно, что оптимальным значением доли детандерного потока в цикле ожижения гелия со ступенью предварительного охлаждения, двумя последовательно включенным детандерами и поршневым детандером на ожижаемом потоке является величина около 0,57 [1]. Однако современные криогенные системы характеризуются широким диапазоном рабочих параметров и зачастую требуют высокой гибкости системы по отношению к параметрам тепловой нагрузки – температуре, производительности по жидкому криопродукту для ожижительных установок или величине тепловой нагрузки для рефрижераторных установок. Так, в одном из самых крупных областей применения криогенной техники, охлаждении сверхпроводящих устройств, требования к параметрам криогенной системы часто имеют динамический характер. Примером такой системы является разрабатываемая в Национальной Ускорительной Лаборатории имени Энрико Ферми криогенная система для сверхпроводящих радиочастотных ускорителей частиц [2]. Проектирование криогенных систем, удовлетворяющих подобным требованиям, требует как проведения динамической оптимизации криогенного цикла с целью выбора оптимальных параметров

на всех режимах работы, так и разработки специализированных систем управления оборудованием таких установок [3].

2. Оптимизация криогенных циклов

При разработке современных криогенных установок существует необходимость в оптимизации криогенных циклов по многим параметрам. Так, для рассматриваемого примера цикла гелиевого ожижителя (рис. 1) необходима оптимизация по степени сжатия в компрессорных агрегатах, степени расширения в детандерах и доле детандерного потока. Работа криогенной установки при оптимальных значениях этих параметров позволяет достичь большей производительности по ожижению гелия при постоянной величине энергозатрат, то есть увеличить общую эффективность системы.

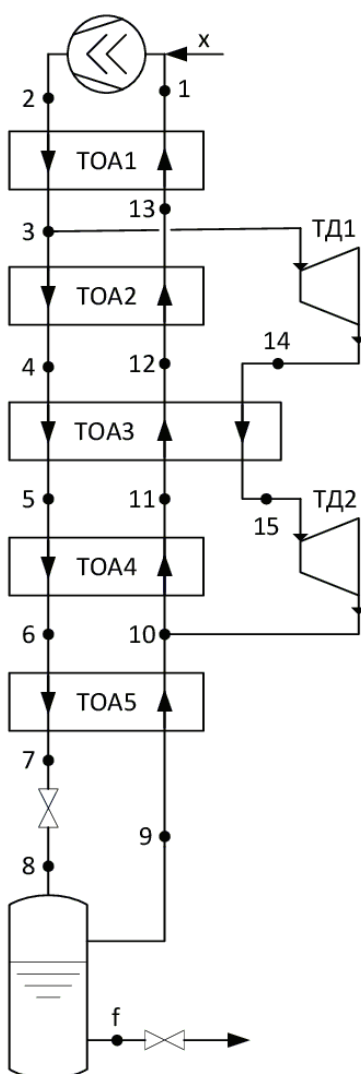


Рис. 1. Схема цикла ожижения гелия с детандированием части потока в последовательно соединенных турбодетандерах

Традиционным методом оптимизации в данном случае является многовариантный расчет (как правило, методом последовательных приближений), результатом которого являются значения исследуемых величин, близкие к оптимальным. Недостатком данного метода оптимизации является «статический» характер оптимизированных параметров, при этом их значения близки к оптимальным только при конкретных значениях рассматриваемых входных параметров (гидросопротивлений теплообменных аппаратов, выбранных величин теплопритоков в различных ступенях цикла, и т. д.). Изменение величины любого из перечисленных параметров в результате изменения режима работы установки неизбежно приведет к изменению оптимального значения оптимизируемых параметров и последующей работе установки на неоптимальных параметрах и пониженной эффективности. Следует также учесть, что параметры эффективности компрессорных и расширительных агрегатов зависят от режимов работы данных агрегатов и, в некоторых случаях, должны учитываться в расчетах в виде дополнительных функциональных зависимостей.

Другой важной особенностью подобного рода оптимизационных расчетов является необходимость использования уравнений состояния реальных газов в виде функциональных зависимостей (уравнений вида Пенга-Робинсона, Бенедикта-Вебба-Рубина, Редлиха-Квонга, и др. [4]), либо таблиц свойств веществ. Использование функциональных зависимостей является более удобным, но связано с относительно низкой точностью данных уравнений (в особенности в области двухфазного состояния веществ), для точного определения функций состояния по табличным данным требуются относительно большие объемы данных для точной аппроксимации функций состояния. Данные особенности затрудняют оптимизационные расчеты параметров установки в реальном времени при работе установки, даже при использовании современных средств вычислительной техники.

Предлагаемым вариантом решения является предварительный расчет оптимизируемых параметров в зависимости от входных переменных и последующее использование этих данных при работе криогенной установки. Представление результатов подобных расчетов возможно как в табличном виде, так и в виде аппроксимирующих функций, в зависимости от возможностей используемой системы управления и контроля установкой. Очевидно, что для получения достаточного количества данных для точной аппроксимации или подробных табличных значений оптимальных режимов необходимо большое количество оптимизационных расчетов для множества значений входных параметров. По причине итеративного характера процесса определения оптимальных

параметров цикла суммарность сложность вычислений при определении функций состояний веществ по табличным данным резко возрастает.

3. Специализированные пакеты свойств веществ

Для решения проблемы высокой вычислительной сложности предварительной оптимизации криогенных циклов предлагается использование в подобных программах специализированных пакетов для вычисления функций состояния различных чистых веществ и их смесей.

В настоящее время существуют как коммерческие версии подобных продуктов (Refprop, GASPAK, NEPAK, Aspen Properties), так и свободные их аналоги (CoolPack, CoolProp, FluidProp и др.). Различаются данные продукты как способом взаимодействия с конечным пользователем (посредством модулей для программных продуктов, модулей для языков программирования, исходных кодов, и т. д.), так и способом вычисления функций состояния (посредством заданных табличных данных и/или заданных уравнений состояния). Окончательный выбор конкретного пакета свойств веществ должен проводиться с учетом программного обеспечения, применяемого для оптимизационных расчетов.

4. Типы оптимизационных расчетов

До начала оптимизационных расчетов необходимо определение следующих параметров, характеризующих программу оптимизации:

- **Количество и вид постоянных и переменных входных параметров оптимизации.** Эти параметры характеризуют степень детализации математической модели, описывающей криогенную систему. Так, как правило, к постоянным входным параметрам оптимизации относятся величины гидросопротивлений теплообменных аппаратов (они могут являться константами, либо определяться из гидравлической модели теплообменного аппарата в виде функции параметров потоков). Как к постоянным, так и к переменным входным параметрам оптимизации может относиться степень повышения давления в компрессорном агрегате. Аналогично возможно прямое введение в модель постоянных коэффициентов эффективности компрессорных и расширительных агрегатов (либо расчет данных характеристик в виде функции эффективности от параметров потока), так и задание данных коэффициентов в виде переменных входных параметров (например, для осуществления оптимизации работы криогенной системы при существенном износе этих агрегатов).

- **Количество и вид оптимизируемых выходных параметров.** В качестве результатов оптимизации могут выступать различные величины. Для рассмотренного примера цикла ожижения гелия (рис. 1) оптимизируемыми параметрами могут выступать:

- доля детандерного потока и степень расширения в первом детандере для фиксированного значения остальных параметров; при этом оптимизация цикла будет проводиться по двум переменным;
- доля детандерного потока, степень расширения в первом детандере и верхнего давления в цикле (степени повышения давления в компрессоре); при этом оптимизация цикла будет проводиться по трем переменным, и т. д.

Количество оптимизируемых параметров может достигать нескольких десятков, при этом оптимизирующей функцией является, как правило, общая эффективность цикла. Результатом оптимизационного расчета являются наборы оптимизируемых параметров $(p_1, p_2, \dots, p_n)$, соответствующие максимуму оптимизируемой функции при заданных значениях переменных входных параметров $(i_1, i_2, \dots, i_m)$.

Процедура оптимизационного расчета заключается в подборе значений $(p_1, p_2, \dots, p_n)$, удовлетворяющих критерию максимизации/минимизации оптимизирующей функции для каждого набора значений $(i_1, i_2, \dots, i_m)$. Такой расчет может проводиться как методом прямого перебора, так и методами поисковой оптимизации. Для последующего использования данных оптимизационного расчета возможно их представление в виде табличных данных, так и в виде аппроксимирующей функциональной зависимости $(p_1, p_2, \dots, p_n) = f(i_1, i_2, \dots, i_m)$. Целесообразность выбора того или иного способа использования данных оптимизационного расчета определяется возможностями используемой системы управления и контроля криогенной установки. Процесс регулирования параметрами криогенной установки заключается в выборе тем или иным способом значений оптимизируемых параметров $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ в зависимости от значений входных параметров $(i_1, i_2, \dots, i_m)$. Как правило, значения входных параметров определяются показаниями датчиков криогенной системы. Наиболее простым методом изменения оптимизируемых параметров до необходимого значения является использование нескольких управляющих контуров, регулирующих значения $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ в системе при помощи ПИД-регуляторов и централизованной системы настройки регуляторов.

5. Примеры оптимизационных расчетов циклов ожижения гелия

В качестве простого примера двухпараметрической оптимизации без переменных входных данных рассмотрены следующие циклы ожижения гелия:

- цикл без предварительного охлаждения с двумя турбодетандерами (последовательное включение) и дроссельной ступенью окончательного охлаждения (рис. 1);
- цикл без предварительного охлаждения с двумя поршневыми детандерами (каскадное включение) и дроссельной ступенью окончательного охлаждения (рис. 2).

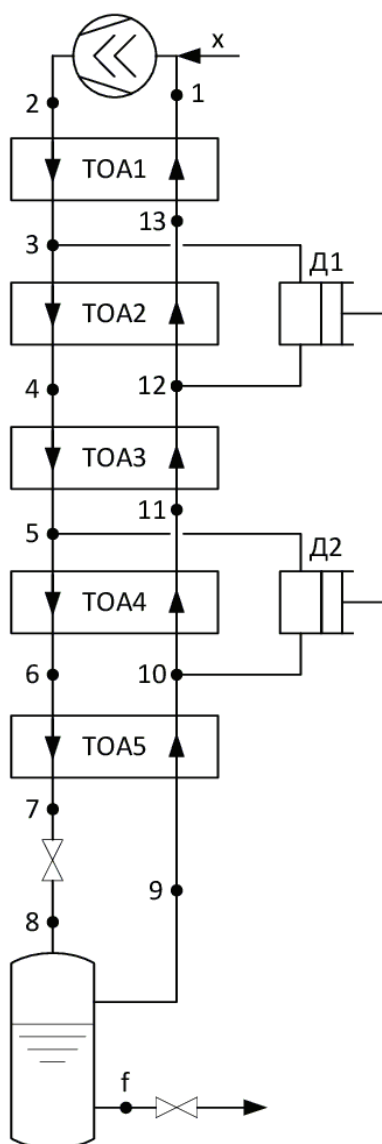


Рис. 2. Схема цикла ожижения гелия с детандированием части потока в поршневых детандерах с каскадным включением

Постоянными входными параметрами оптимизации для каждого из циклов являются следующие величины:

- давления прямого и обратного потоков;
- гидросопротивления теплообменных аппаратов;
- начальная температура гелия;
- относительные недорекупации первой и второй ступеней;
- теплопритоки к трем ступеням цикла;
- коэффициенты эффективности компрессорных и детандерных агрегатов.

Для цикла с двумя турбодетандерами (рис. 1) изначальными оптимизируемыми параметрами являются:

- доля детандерного потока (D);
- промежуточное давление после расширения в первом детандере (p_{14}).

В качестве оптимизируемой функции выступает коэффициент ожижения, определяемый как доля жидкого гелия в потоке после расширения в дроссельном устройстве (x).

Несложно показать, что зависимость вида $x = f(D, p_{14})$ можно привести к виду $x = g(T_3, T_{10})$, где T_3 – температура прямого потока после первого теплообменного аппарата, T_{13} – температура обратного потока после второго теплообменного аппарата. Подобное преобразование проводится лишь в целях ускорения процесса оптимизационного расчета, после завершения которого возможно обратное преобразование к исходным оптимизируемым параметрам.

Результирующая зависимость вида $x = g(T_3, T_{10})$ является решением системы уравнений теплового баланса ступеней цикла криогенной системы:

$$h_2 + (1 - x) \cdot h_{12} + q_{cm1} = (1 - x) \cdot h_1 + (1 - D) \cdot h_4 + D \cdot h_3,$$

$$(1 - D_1) \cdot h_4 + D \cdot h_{14} + (1 - D - x) \cdot h_{10} + q_{cm2} = (1 - x) \cdot h_{12} + (1 - D) \cdot h_6 + D \cdot (h_{15} - h_{10}),$$

$$(1 - D_1) \cdot h_6 + q_{cm3} \cdot (1 - D) = (1 - D - x) \cdot h_{10} + h_f \cdot x,$$

где h_i ($i = 1 \dots 15$) – энтальпии потоков в соответствующих точках цикла; q_{cm1} , q_{cm2} , q_{cm3} – теплопритоки к соответствующим ступеням цикла криогенной установки; D_1 , D_2 – доли детандерных потоков через первый и второй детандеры, x – доля жидкости в продукционном потоке после дросселирования.

Графическая интерпретация процесса оптимизации представлена на рис. 3. Ввиду наличия только двух оптимизируемых параметров оптимизируемая функция может быть представлена в виде поверхности в осях оптимизируемых параметров. Максимуму

функции $x = g(T_3, T_{10})$ соответствуют оптимальные значения параметров T_3 и T_{10} , при которых величина коэффициента ожижения x достигает своего максимального значения.

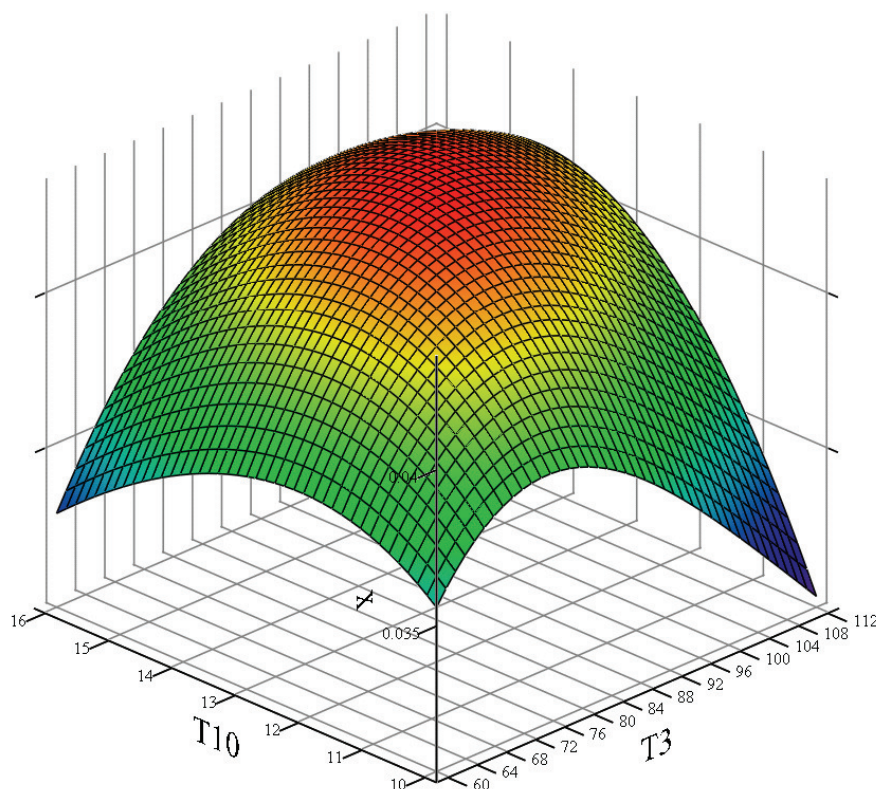


Рис. 3. Графическая интерпретация процесса оптимизации

Для цикла с двумя поршневыми детандерами (рис. 2) изначальными оптимизируемыми параметрами являются:

- доля детандерного потока в первом детандере (D_1);
- доля детандерного потока во втором детандере (D_2).

В качестве оптимизируемой функции выступает коэффициент ожижения, определяемый как доля жидкого гелия в потоке после расширения в дроссельном устройстве (x).

Несложно показать, что зависимость вида $x = f(D_1, D_2)$ можно привести к виду $x = g(T_{10}, T_{12})$, где T_{10} – температура обратного потока после пятого теплообменного аппарата, T_{12} – температура обратного потока после третьего теплообменного аппарата. Подобное преобразование проводится лишь в целях ускорения процесса оптимизационного расчета, после завершения которого возможно обратное преобразование к исходным оптимизируемым параметрам.

Результирующая зависимость вида $x = g(T_{10}, T_{12})$ является решением системы уравнений теплового баланса ступеней цикла криогенной системы:

$$h_2 + (1 - D_1 - x) \cdot h_{12} + q_{cm1} = (1 - x) \cdot h_1 + (1 - D_1) \cdot h_4 + D_1 \cdot (h_3 - h_{12}),$$

$$(1 - D_1) \cdot h_4 + (1 - D_1 - D_2 - x) \cdot h_{10} + q_{cm2} \cdot (1 - D_1) = (1 - D_1 - x) \cdot h_{12} + \\ + (1 - D_1 - D_2) \cdot h_6 + D_2 \cdot (h_5 - h_{10}),$$

$$(1 - D_1 - D_2) \cdot h_6 + q_{cm3} \cdot (1 - D_1 - D_2) = (1 - D_1 - D_2 - x) \cdot h_{10} + h_f \cdot x,$$

где h_i ($i = 1 \dots 13$) – энтальпии потоков в соответствующих точках цикла; q_{cm1} , q_{cm2} , q_{cm3} – теплопритоки к соответствующим ступеням цикла криогенной установки; D – доля детандерного потока, x – доля жидкости в продукционном потоке после дросселирования.

Графическая интерпретация процесса оптимизации представлена на рис. 4. Ввиду наличия только двух оптимизируемых параметров оптимизируемая функция может быть представлена в виде поверхности в осях оптимизируемых параметров. Максимуму функции $x = g(T_{10}, T_{12})$ соответствуют оптимальные значения параметров T_{10} и T_{12} , при которых величина коэффициента ожижения x достигает своего максимального значения.

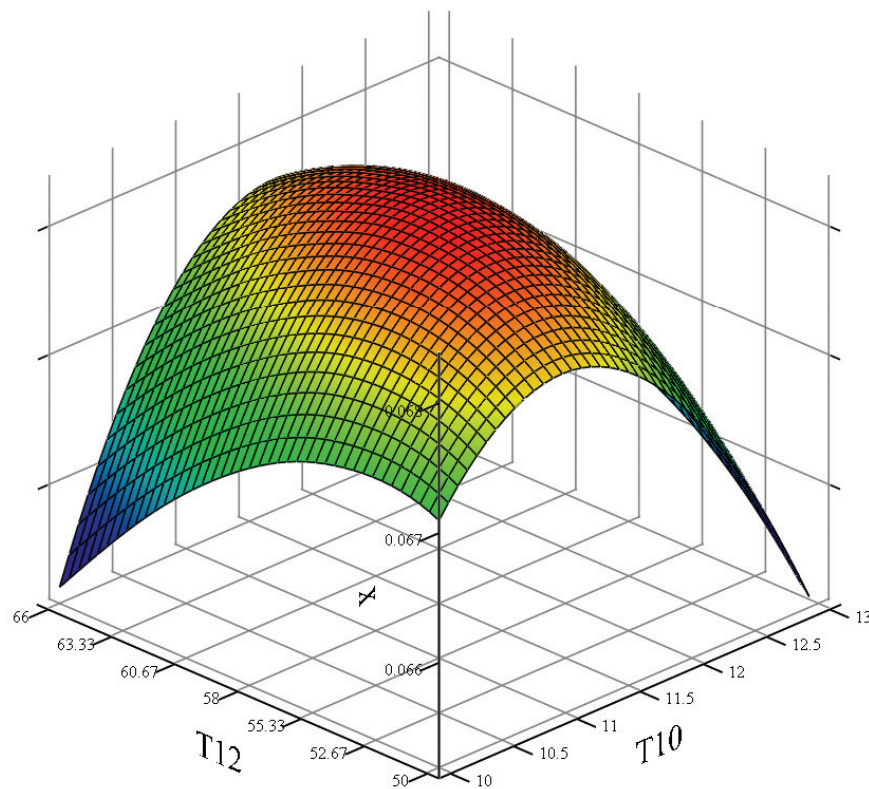


Рис. 4. Графическая интерпретация процесса оптимизации

Оптимизационные расчеты проведены в системе математических расчетов MathCAD, уравнения состояния гелия импортированы из программного пакета свойств веществ CoolProp.

6. Заключение

В данной статье рассмотрен метод динамической оптимизации криогенных циклов для совершенствования современных установок криогенной техники. Разработанный метод динамической оптимизации позволяет повысить гибкость криогенных систем по отношению к параметрам рабочих режимов, а также повысить общую эффективность криогенных систем. С использованием разработанной методики оптимизационного расчета проведена двухпараметрическая оптимизация двух комбинированных криогенных циклов ожижения гелия с целью оптимизации цикла по коэффициенту ожижения.

Применение данной методики динамической оптимизации циклов криогенных систем необходимо, в первую очередь, для совершенствования современных установок низкотемпературной техники с точки зрения энергетической эффективности. Современный уровень развития вычислительных систем и систем управления и контроля позволяет выполнить весь комплекс оптимизационных мероприятий на самых ранних этапах разработки криогенных систем.

Список литературы

1. Криогенные системы: учебник для вузов: в 2-х т. / Архаров А. М., Архаров И. А., Беляков В. П. и др. – Москва: Машиностроение, 1999. – С. 208-213. – 2 т.
2. Measurements of SCRF Cavity Dynamic Heat Load in Horizontal Test System. B. DeGraff, R. Bossert, L. Pei, W. Soyars. [ed.] J. Weisend. Melville: American Institute of Physics, 2008. Advances in Cryogenics Engineering. Vol. 55, pp. 609-614.
3. Нагимов Р. Р. Разработка стратегии системы контроля процессом сжатия гелия низкого давления / Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 2. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0213.0539096>
4. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие / Пер. с англ. под ред. Б. И. Соколова. - 3-е изд., перераб. и доп. - Л.: Химия, 1982 г. - 592с., ил. - Нью-Йорк, 1977.