

А.В. Троценко

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, 65082, г. Одесса, Украина
e-mail: trotalex@rambler.ru

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ

На примере цикла высокого давления криогенной системы проанализированы особенности и недостатки современного представления расчётной схемы энергетической установки. Изложены правила трансформации обычной расчётной схемы в её формализованный вариант. Рассмотрена специфика составления графа энергетических потоков низкотемпературной системы и приведены примеры его использования при составлении энергетических балансов для совокупности элементов данной системы.

Ключевые слова: Криогенная система. Расчётная схема. Формализация. Узловая точка. Граф. Энергетический баланс.

A.V. Trotsenko

FORMALIZED SCHEMES REPRESENTATION FOR LOW TEMPERATURE SYSTEMS

On the example of the high-pressure cycle of cryogenic system the features and shortcomings of modern representation for design scheme of energy plant are analyzed. The rules of usual calculation scheme transformation to its formalized variant are presented. The specificities of the graph drawing energy flows in low-temperature system are considered, and examples of its usage to equate the energy balances for the system elements set are represented.

Keywords: Cryogenic system. Design scheme. Formalizing. Nodal point. Graph. Energetic balance.

1. ВВЕДЕНИЕ

Формализованное представление расчётных (принципиальных) схем является одним из этапов создания современного методического обеспечения для проектирования и анализа энергетических установок. Основная особенность такого обеспечения состоит в его компьютерной ориентированности, которая в свою очередь предполагает унификацию, пересмотр и уточнение некоторых традиционных понятий. Некоторые шаги в этом направлении уже сделаны. Прежде всего необходимо было пересмотреть одно из базовых понятий расчётной схемы — узловой точки. В статье [1] дано обобщенное определение узловой точки как набора характеристик каждого энергетического потока, связанного с конкретным элементом установки. Данная дефиниция позволила классифицировать возможные типы узловых точек по видам представляемых ими энергетических потоков. В работах [1,2] рассмотрены разные подходы к реализации атрибутов этих точек в моделирующих алгоритмах термодинамических расчётов.

На следующем этапе формализации математической модели (ММ) энергетической установки предложено определение элемента схемы энергетической

установки как множества узловых точек разного типа [3] и составлен унифицированный список атрибутов для любого элемента установки. В статье [3] рассмотрены особенности связей между энергетическими потоками в элементе установки, а также приведены формализованные схемы ряда элементов криогенных систем. Дальнейший этап совершенствования ММ энергетической установки предполагает модификацию её расчётной схемы.

Существующие в научной и учебной литературе представления расчётных схем энергетических установок и их частей не претерпели принципиальных изменений за все время своего существования. В криогенной технике можно отметить лишь трансформации условных обозначений и имен элементов схем. Между тем эти схемы активно используются при создании ММ установок, в частности, для идентификации узловых точек, составления энергетических и материальных балансов. Расчётная схема должна в известной мере отражать уровень развития науки, а также уровень используемой вычислительной техники.

Цель данной работы — сформулировать новые, отвечающие современным требованиям правила к составлению расчётных схем энергетических установок. В качестве объектов, используемых для приме-

ров, будут использованы схемы и элементы криогенных систем.

2. ПРИЧИНЫ И ОСОБЕННОСТИ МОДИФИКАЦИИ СХЕМ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК

Основными задачами, которые ставятся при создании расчётной схемы энергетической установки, являются:

1. Разработка графического образа, упрощающего изложение и восприятие принципа работы рассматриваемого объекта.

2. Выявление основных элементов системы, которые будут учтены при создании её математической модели.

3. Идентификация основных элементов системы с помощью принятых условных графических и текстовых обозначений этих элементов.

4. Установление материальных и энергетических связей между элементами данной системы.

5. Идентификация и нумерация узловых точек схемы, которая будет использована при создании ММ системы.

На рис. 1 представлен вариант обычного изображения расчётной схемы для криогенной рефрижераторной установки, работающей по циклу высокого давления.

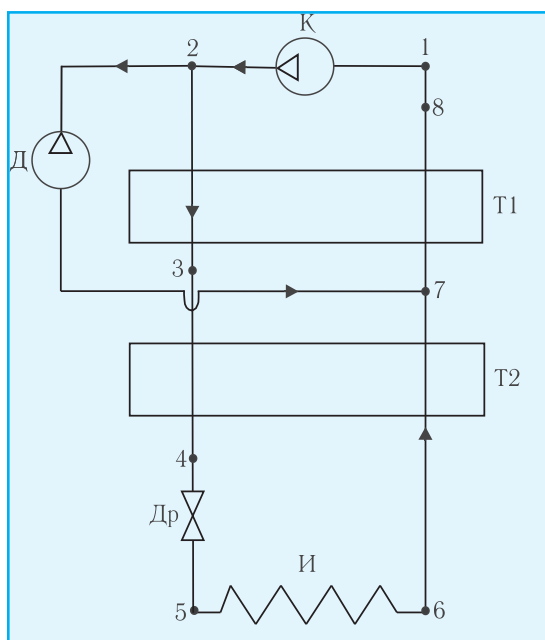


Рис. 1. Схема криогенной установки, реализующей цикл высокого давления:
 К — компрессор; Д — детандер;
 Т1, Т2 — теплообменники;
 Др — дроссель; И — испаритель

Главная особенность данного изображения расчётной схемы криогенной системы заключается в том, что она явно отражает лишь материальные потоки. Это выражается в том, что на ней приведены только узловые точки, характеризующие потоки рабочего тела (M -точки). При этом даже для этих потоков имеет-

ся ряд моментов, которые должны восприниматься на интуитивном уровне, что является недопустимым при формализованном подходе.

Первый момент заключается в неоднозначном определении атрибутов узловых точек 2 и 7, которые характеризуют процессы разделения и смешения потоков рабочего тела. Даже, если допустить, что данные процессы являются изобарными и изотермическими, то все равно остаются неопределёнными значения расходов криоагента в этих узловых точках. Подобный случай наблюдается и при добавлении в криогенную оживительную установку потока массы извне. Между тем, расход наравне с набором термодинамических функций является атрибутом узловой M -точки [1]. Для устранения существующей неопределённости целесообразно ввести в схему следующие элементы: разделитель Р и смеситель См. Данная трансформация схемы сопровождается появлением дополнительных M -точек.

Следующий момент касается узловых M -точек 1 и 8, расположенных на одной ломаной линии. Точка 1 характеризует состояние рабочего тела перед компрессором, а точка 8 — после теплообменника Т1. В большинстве математических моделей они отличаются прежде всего температурами T_1 и T_8 . Разность этих

температур является недорекуперацией на тёплом конце теплообменника Т1 и обеспечивает его термодинамическую работоспособность [4].

Физически ломанная линия между элементами Т1 и К представляет собой участок трубопровода криогенной установки. Как правило, при построении ММ системы трубопровод считается её идеальным звеном, т. е. характеристики рабочего тела не меняются вдоль его длины. Это даёт основание и возможность ставить узловую точку в любом месте данной линии и приводит к требованию, чтобы она имела на этой линии только одну M -точку. Последнее требование для рассматриваемой ломаной линии не выполняется. Разрешить возникшее противоречие можно, добавив в схему дополнительный элемент — догреватель Дг и расположив его между точками 8 и 1. Догреватель используется также в качестве элемента газификационных установок.

Формализованный термодинамический расчёт схем установок предполагает использование, кроме узловых M -точек, также Q - и L -точек, соответственно характеризующих потоки энергии в форме тепла и работы [1]. На рис. 1 эти потоки вообще не отражены, на других схемах они лишь обозначены. Так как в энергетических балансах учитывать качество энергии нет надобности, то целесообразно на отдельных направленных отрезках линий именовать Q - и L -точки аналогично M -точкам. В то же время, качество энергетических потоков необходимо определять при составлении эксергетических балансов [5]. Это возможно осуществить на схемах, представляя потоки различного качества линиями неодинакового типа (сплошные, штриховые, пунктирные) или разного цвета.

На рис. 2 приведен вариант формализованной схемы цикла, изображенного на рис. 1. На рис. 2 материальные потоки обозначены сплошными линиями, потоки тепла и работы — соответственно штриховыми и пунктирными отрезками прямых. Необязательные обозначения, связанные с энергетическими потоками, имеют следующий смысл: G_k, G_d — соответственно расход газа через компрессор и детандер; L_k, L_d — соответственно работа, затраченная в компрессоре и полученная в детандере; Q_0 — тепло, отведенное от установки в окружающую среду; Q_2, Q_{31}, Q_{32} — тепло, подведенное из окружающей среды, соответственно, к догревателю, теплообменникам Т1 и Т2; Q_x — холодопроизводительность установки.

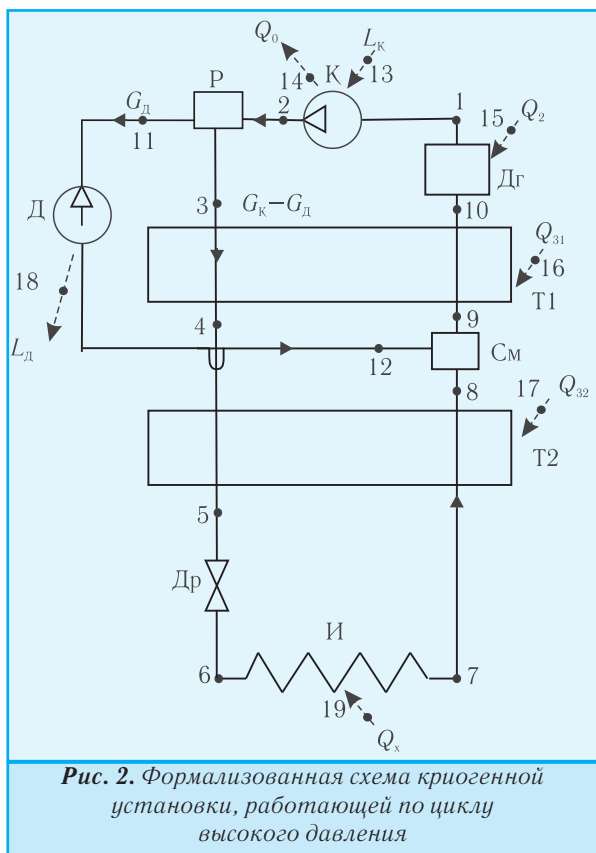


Рис. 2. Формализованная схема криогенной установки, работающей по циклу высокого давления

Из сравнения рисунков 1 и 2 следует, что переход к формализованной схеме значительно увеличивает число узловых точек, но при этом исчезают неоднозначности в определении их атрибутов. Для обеих схем существенным является то, что для составления на их основе термодинамической модели нет необходимости в конкретизации внешних объектов, с которыми взаимодействует вся установка.

Резюмируя, на примере цикла высокого давления криогенной установки, можно заключить, что основные правила создания формализованной расчетной схемы сводятся к следующему:

1. Если в системе происходит разделение или смешение энергетических потоков, то необходимо узловые точки, характеризующие эти процессы, заменить элементами — соответственно разделителем и смесителем.

2. На отрезке линии, представляющей энергетический поток, не может быть более одной узловой точки.

3. Энергетические потоки в форме тепла и работы, также как и материальные потоки, должны идентифицироваться нумерованной узловой точкой.

4. Для проведения термодинамического анализа энергетической системы целесообразно разные виды потоков энергии выделять либо с помощью цвета линий, либо выбором типа линий.

3. ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СХЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ПОМОЩЬЮ ГРАФОВ

Ещё один возможный способ представления расчетных схем энергетических установок основан на использовании теории графов [6]. Существует достаточное число работ, например [7], в которых исследуются аспекты применения графов при анализе и синтезе систем преобразования энергии. В данном разделе рассматриваются особенности создания и математического представления графов в задачах разработки термодинамических моделей криогенных систем. Известно, что в виде графа могут быть изображены изменения в установке многих физических величин. Для разработки термодинамической модели наибольший интерес представляет *E*-граф, отражающий энергетические потоки в рассматриваемой системе.

Так как данные потоки имеют направления, то *E*-граф является ориентированным (орграфом). При построении *E*-графа возможны варианты с выбором его элементов: вершин и дуг. Для удобства составления энергетических балансов целесообразно выбирать, как будет показано далее, в качестве вершин — элементы схемы, а в качестве дуг — линии, соединяющие эти элементы. В таком случае для построения *E*-графа системы в целом или её подсистемы в формализованную расчётную схему необходимо вводить дополнительные элементы. Это обусловлено обязательным требованием, чтобы дуга начиналась и заканчивалась в элементе.

В качестве примера на рис. 3 отражены возможные варианты представления графа для дросселя, изображенного в схеме криогенной установки (см. рис. 2).

На рис. 3,а в качестве вершин графа выбраны узловые *M*-точки, а дугой является сам элемент установки. В графе 3,б вершины представлены элементами рассматриваемой криогенной системы, а дуги — линиями, соединяющими эти элементы. Как видно, в последнем случае в граф введены дополнительные элементы Т2, И.

Для энергетической системы при построении *E*-графа необходимо обязательно ввести в рассмотрение хотя бы один элемент — окружающую среду ОС, учитывающий взаимодействие с ней данной системы. Тогда узловые точки 13-19 из рис. 2 получают при создании *E*-графа элемент ОС как недостающую вершину. Возможно и целесообразно более детальное представление окружения энергетической системы с помощью дополнительных элементов. Такими для криогенной системы могут являться потребитель вырабатываемо-

го ею продукта Π , элементы ступеней подготовки рабочего тела (например, теплоизолированные цистерны для хранения жидкости, используемые для промежуточного охлаждения основного рабочего тела) и др.

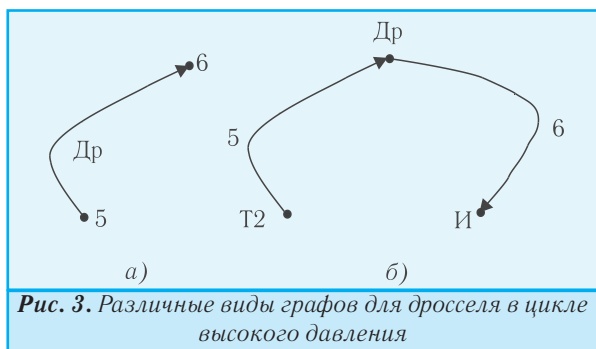


Рис. 3. Различные виды графов для дросселя в цикле высокого давления

Качество каждого из видов энергетического потока в криогенной системе рассчитывается по своему математическому соотношению [5]. Поэтому подобно формализованной расчётной схеме целесообразно выделить в E -графе три составляющих: M -, Q - и L -подграфы, соответственно описывающие потоки энергии, массы, тепла и работы. Такое выделение возможно осуществить за счёт цвета дуг или типов их линий.

На рис. 4 представлен оргграф цикла высокого давления с двумя дополнительными элементами ОС и П. В качестве его вершин выбраны элементы установки, а дуг — линии, соединяющие эти элементы. Обозначения дуг определяется номером узловой точки на рис. 2. На данном рисунке черным цветом дуг представлен M -подграф, а синим и красным соответственно Q - и L -подграфы.

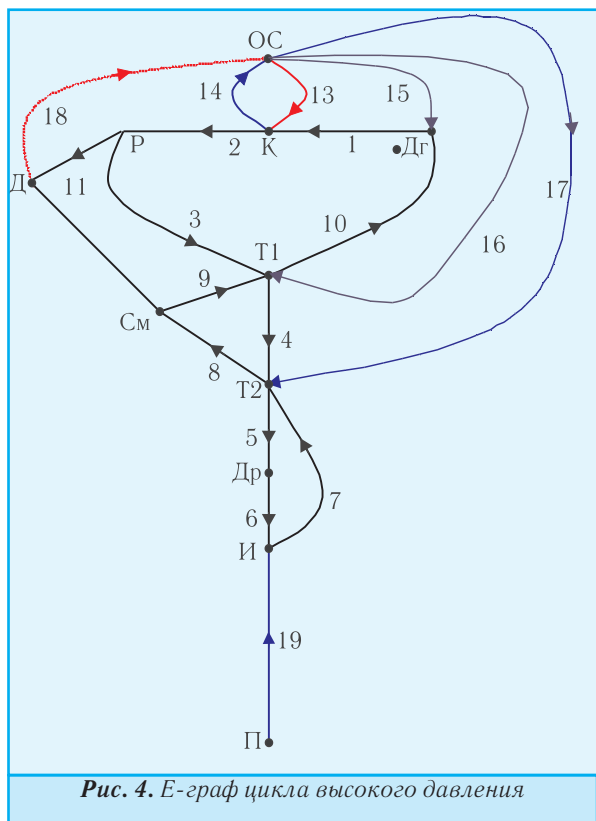


Рис. 4. E -граф цикла высокого давления

Для термодинамической модели энергетической системы основной интерес имеет не образ E -графа, а его математическое представление в виде матрицы инцидентности, которая в данном случае обозначается символом E . Матрицу E для графа, изображённого на рис. 4, представим в следующем виде:

$$E = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{К} & \text{Р} & \text{Дг} & \text{Д} & \text{Т1} & \text{См} & \text{Т2} & \text{Др} & \text{И} & \text{ОС} & \text{П} \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \end{matrix} & \begin{matrix} \begin{bmatrix} +1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} \end{matrix}$$

Несмотря на то, что задание графа с помощью матрицы инцидентности является неэкономным способом, именно он представляется наиболее перспективным для решения различных задач, связанных с расчётами и исследованиями термодинамической модели низкотемпературной системы. В частности, достаточно просто и формально решается задача установления энергетических потоков и их направления при составлении энергетического баланса для некоторой, ограниченной замкнутым контуром A , совокупности элементов установки. Для этого достаточно сложить столбцы E -матрицы для элементов установки, включенных в данный контур. В результате получится вектор-столбец A , отличные от нуля компоненты которого будут определять номера узловых точек. Данные точки нужно учитывать при составлении энергетического баланса. При этом значения компонентов вектора A , равные $+1$, соответствуют входящим в контур энергетическим потокам, а -1 — выходящим из него.

При составлении энергетического баланса с помощью графа необходимо иметь в виду, что для контура, охватывающего все элементы установки, включая ОС и П, получается тривиальное решение. В этом случае система является изолированной и ей соответствуют только нулевые значения компонентов полученного вектора A .

Ниже приведены результаты решения сформулированной выше задачи для контура $A(K+P+Dg)$, в ко-

торый входят компрессор, разделитель и догреватель. Ниже приведены компоненты вектора-строки A^T , транспонированного вектора-столбца A ,

$$A^T = (0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, +1, -1, 0, +1, -1, +1, 0, 0, 0, 0).$$

Относительно простое решение рассмотренной задачи даёт возможность приступить к решению более сложных задач, связанных с разработкой упрощенных алгоритмов термодинамического расчёта циклов энергетических установок. В частности, это касается выявления совокупностей элементов установки, содержащих в уравнении энергетического баланса одну неизвестную величину.

4. ВЫВОДЫ

Главные результаты представленной работы приводят к следующим выводам:

1. Существующие изображения расчётных схем энергетических установок не могут быть использованы для разработки формализованных методов их термодинамического расчёта.
2. Для создания формализованных расчётных схем установок необходимо исключить неоднозначности в определении атрибутов узловых точек разного типа за счёт введения в схемы дополнительных элементов и нумерации этих точек для всех видов энергетических потоков.
3. Представляется перспективным использование

в моделирующих алгоритмах для термодинамического расчёта схем энергетических установок способа задания E -графа с помощью матрицы инцидентности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троценко А.В. Формализация понятия узловой точки термодинамической системы// Технические газы. — 2008. — № 1. — С.59-63.
2. Бодюл С.В., Таран В.Н. Алгоритмизация расчётов циклов криогенных систем. Базовые понятия и принципы// Технические газы. — 2006. — № 4. — С. 12-18.
3. Троценко А.В. Формализация элементов энергетических систем// Технические газы. — 2010. — № 4. — С. 65-69.
4. Троценко А.В., Поддубная М.В. Восстановление термодинамической работоспособности двухпоточного теплообменника в цикле высокого давления путём изменения расходов рабочих тел// Технические газы. — 2012. — № 1. — С. 56-61.
5. Бродянский В.М., Семенов А.М. Термодинамические основы криогенной техники. — М.: Энергия, 1980. — 448 с.
6. Кузнецов О.П., Адельсон-Вельский Г.М. Дискретная математика для инженера. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 480 с.
7. Никульшин В.Р., Никульшина Д.Г. Граф термодинамических затрат в задачах оптимального синтеза систем холодильной техники// Холодильная техника и технология. — 1984. — Вып. 39. — С. 38-43.

ТРИНАДЦАТЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР

ППРВ-2012

СЕМИНАР ПРОВОДИТСЯ
УКРАИНСКОЙ АССОЦИАЦИЕЙ
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ
ГАЗОВ "УА-СИГМА"

ПОД ЭГИДОЙ:
- МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ
И УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ УКРАИНЫ
- МИНИСТЕРСТВА ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И ТОРГОВЛИ РФ
- ОДЕССКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ
АКАДЕМИИ ХОЛОДА
- МЕЖДУНАРОДНОЙ АКАДЕМИИ ХОЛОДА

ПРИ УЧАСТИИ:
- ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ
ГОРНОГО НАДЗОРА И ПРОМЫШЛЕННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ УКРАИНЫ
- ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ,
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ РФ

И ПРИ СОДЕЙСТВИИ:
- МЕЖДУНАРОДНОЙ ГРУППЫ "РЕДКИЕ ГАЗЫ"
(Г. МОСКВА, РФ)
- ЛАО "СУМСКОЕ НПО ИМ. М.В. ФРУНЗЕ"
(Г. СУМЫ, УКРАИНА)
- ОАО "КРИОГЕНМАШ"
(Г. БАЛАШИХА, РФ)
- ПКФ "КРИОПРОМ" ООО
(Г. ОДЕССА, УКРАИНА)
- ЗАО "КИСЛОРОДНЫЙ ЗАВОД"
(Г. КИЕВ, УКРАИНА)
- ООО "ЛИНДЕ ГАЗ УКРАИНА"
(Г. ДНЕПРОПЕТРОВСК, УКРАИНА)
- ЛАО "ХАРЬКОВСКИЙ АВТОГЕННЫЙ ЗАВОД"
(Г. ХАРЬКОВ, УКРАИНА)

Секретариат оргкомитета :
65026, Украина, Одесса-26, а/я 188
Тел/факс: +380 48 777 0087
E-mail: uasigma@paco.net
Http://www.uasigma.odessa.ua

Генеральный информационный спонсор



**«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
И БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВ
ПРОДУКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА»**

**1-5 октября 2012 года
г. Одесса**




Место проведения семинара:
гостиница "Виктория", расположенная
в знаменитом курортном районе г. Одессы — Архадии.

Условия проживания:
одноместные номера со всеми удобствами.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА:





