

УДК 621.59

И.Ф. Кузьменко*, И.М. Морковкин, Ю.И. Духанин, К.В. Безруков

ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 143907

*e-mail: kuzmenko@cryogenmash.ru

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ КРИОГЕННЫХ ГЕЛИЕВЫХ СИСТЕМ

Практическое использование сверхпроводников в уникальных комплексах для проведения фундаментальных исследований в области управляемого термоядерного синтеза и физики высоких энергий обусловило создание ОАО «Криогенмаш» крупных криогенных гелиевых систем. Были также разработаны и построены различные криогенные системы для перспективных объектов электроэнергетики. Рассмотрены теоретические предпосылки, логические построения и исторический опыт развития и создания гелиевых систем криогенного обеспечения объектов со сверхпроводящими устройствами. В основу были положены подходы и идеи П.Л. Капицы, заложенные и реализованные им ещё в 30-ых годах прошлого века и получившие убедительное теоретическое обоснование в его более поздних работах. На основе этих работ под руководством В.П. Белякова в ОАО «Криогенмаш» были развернуты обширные исследования и конструкторские разработки, завершившиеся созданием ряда уникальных систем криогенного обеспечения в ведущих научных центрах страны. В процессе этих работ сформировалась концепция построения систем криогенного обеспечения, правильность которой подтверждается также опытом последнего десятилетия.

Ключевые слова: Ожижитель гелия. Гелиевый рефрижератор. Система криогенного обеспечения. Сверхпроводимость. Удельный расход энергии. Потери от необратимости. Избыточный обратный поток. Одноконтурная и двухконтурная системы охлаждения. Контур циркуляции. Регулирование холодопроизводительности.

I.F. Kuzmenko, I.M. Morkovkin, Yu.I. Duhanin, K.V. Bezrukov**SCIENTIFIC AND TECHNICAL BASES FOR DEVELOPMENT OF CRYOGENIC HELIUM SYSTEMS**

The creation by JSC «Cryogenmash» the large cryogenic helium systems has caused by practical use of superconductors at creation of unique complexes for carrying out of basic researches in the field of controlled thermonuclear synthesis and high-energy physics. Also various cryogenic systems for perspective objects of electric power industry have been developed and constructed. Theoretical preconditions, logic constructions and historical experience of development and creation of helium systems of cryogenic maintenance of objects with superconducting devices are considered. Approaches and ideas by P.L. Kapitsa which incorporated and realized by him even in 30 years of the last century and has received a convincing theoretical substantiation in his later works have been put in a basis. On the basis of these works under management by V.P. Belyakov in JSC «Cryogenmash» an extensive researches and design development which were come to the end with creation of some unique systems of cryogenic maintenance in leading science institutes of the country have been developed. During these works the concept of systems' construction of cryogenic maintenance was generated which correctness also proves to be true by experience of last decade.

Keywords: Helium liquefier. Helium refrigerator. System of cryogenic maintenance. Superconductivity. Specific power consumption. Losses from irreversibility. Superfluous return stream. One-planimetric and two-planimetric systems of cooling. Contour of circulation. Regulation of refrigerating capacity.

1. ВВЕДЕНИЕ

Десять лет назад по случаю 50-летия ОАО «Криогенмаш» нами была опубликована статья [1], в которой достаточно подробно были изложены особенности и области применения криогенных гелиевых систем (КГС), организация их разработки и производства, научно-технические результаты и приведено описание наиболее характерных систем. Также нами была отдана дань уважения и благодарности коллективам конструкторов, исследователей, специалистов и рабочих, посвятивших лучшие годы своей жизни разработке криогенных гелиевых систем и вдохнувших жизнь в сложнейшие технические комплексы. Особая благодарность и уважение выражены как руководителям предприятия, так и начальникам научно-исследовательских, конструкторских и производственных подразделений (*В.П. Белякову, Н.В. Филину, В.Г. Пронько, Ф.А. Русаку, В.Д. Коваленко, И.К. Буткевичу, Ю.П. Алексееву* и многим другим), взявшим на себя груз ответственности и тяготы создания новой техники.

Полностью подтверждая справедливость оценок и положений статьи [1], в настоящей работе нами сосредоточено основное внимание на научно-технических аспектах разработки гелиевых систем и установок криогенного обеспечения СП-объектов.

В начале 70-ых гг. в ОАО «Криогенмаш» было разработано и поставлено в различные научные центры несколько достаточно крупных криостатов для экспериментальных СП-магнитов погружного типа с охлаждением на базе стандартных ожижителей гелия. Однако совершенно другие задачи возникли при разработке систем криогенного обеспечения (СКО) установок управляемого термоядерного синтеза и ускорителей заряженных частиц. Большое число и разнообразие объектов охлаждения (СП-обмотки, токовводы, экраны, инжекторы и т.п.) определяли для СКО сочетание ожижительной и рефрижераторной нагрузок на различных температурных уровнях, изменяющихся во времени, и часто с необходимостью компенсации пиковых тепловыделений. К этому надо добавить большие объёмы полостей объектов (до 200 м³ для циркуляционных и до 2000 м³ для погружных магнитов), а также охлаждаемые массы, достигающие сотен тонн и более. Картину дополняют весьма разветвлённые и протяжённые коммуникации криогенных трубопроводов.

К криогенным системам подобного назначения предъявляются требования высокой термодинамической эффективности, надёжности и длительности непрерывной работы, обеспечения автоматизированного управления во всех режимах нормальной работы, пуска и аварийных остановок. Указанные особенности вызвали необходимость разработки ряда специфических схемно-технологических решений для создания СКО, базирующихся, тем не менее, на общих положениях, рассмотренных ниже. Отметим, что весьма обширная область процессов теплообмена и гидродинамики в объектах криостатирования в настоящей работе не рассматривается при всей её важности для разработки СКО.

2. ОТ ОЖИЖИТЕЛЯ П.Л. КАПИЦЫ К СПЕЦИАЛЬНЫМ КРИОГЕННЫМ ГЕЛИЕВЫМ СИСТЕМАМ

В начале 30-ых годов *П.Л. Капица* обосновал концепцию детандерного цикла для ожижения гелия и впервые в мире в 1934 г, т.е. 75 лет назад, построил гелиевый ожижитель с предварительным азотным охлаждением и гелиевым детандером. В 1959 г. он опубликовал работу, в которой были заложены основы теории и расчёта гелиевого ожижительного цикла с каскадным включением нескольких детандеров в качестве главного направления развития ожижителей [2]. Хотя при постановке задачи было принято допущение об идеальности газа, полученные зависимости для оптимальных температурных уровней включения в цикл детандеров и влияния числа детандерных ступеней на его эффективность, носят принципиальный характер. Впоследствии найденные зависимости уточнялись за счёт введения поправок на реальные свойства гелия, что, например, отражено в [3]. С развитием вычислительной техники проблемы оптимизации параметров криогенных гелиевых установок решались не только с учётом реальных свойств, но и их схемных и конструктивных особенностей.

С появлением практического интереса к разработке гелиевых рефрижераторов было обращено внимание на существенные различия в результатах анализа ожижительных и рефрижераторных циклов [4]. Установлено, что в отличие от ожижительного цикла, имеющего обратный поток меньше прямого, рефрижераторный цикл осуществим и при одном детандере. При переходе от одного детандера к двум эффективность рефрижераторного цикла возрастает на 28 %, при переходе к трём детандерам только на 4 % по сравнению с 30 % для ожижительного, а при увеличении числа детандеров до 4-ёх, соответственно, 2 % для рефрижераторного и 20 % — для ожижительного.

Указанная закономерность свидетельствует о том, что в гелиевых циклах соотношение расходов прямого и обратного потоков существенно сказывается на значениях термодинамической эффективности и показателях циклов в зависимости от числа детандерных ступеней. Другое дело, что в схемах отдельных ожижителей и рефрижераторов по существу нет вариантов или способов воздействия на отмеченное соотношение расходов. Однако применительно к крупным криогенным гелиевым системам (КГС), в которых по-разному сочетаются ожижительные и рефрижераторные нагрузки, отношение расходов обратного потока к прямому может быть больше единицы, например, за счёт подлива жидкого гелия из системы ожижения в обратный поток. Очевидно, что «избыток» обратного потока резко увеличивает эффективность рефрижераторных циклов даже при использовании наиболее простых вариантов с дросселированием или с применением концевого детандера.

Подобный подход, имевший положительные практические последствия, был разработан группой специалистов ОАО «Криогенмаш» [5], получил рас-

чётно-теоретическое обоснование [6] и широкое практическое применение [7].

Известно, что классический рефрижераторный цикл с концевым детандером на всём потоке из-за чрезвычайно низкой эффективности практически не применяется для криостатирования объектов на гелиевом уровне температур даже при использовании предварительного азотного охлаждения. Регенеративный дроссельный цикл вообще непригоден для этих целей. Незначительное же увеличение расхода обратного потока по отношению к прямому потоку резко увеличивает эффективность этих циклов вследствие существенного снижения потерь от необратимости реализуемых процессов.

Принципиальная схема криогенной гелиевой системы включает многоступенчатый ожижитель гелия с расходным резервуаром и коллектором жидкого гелия, от которого подпитываются рефрижераторы с избыточным обратным потоком. В работах [6,7] приведены удельные характеристики полезной холодопроизводительности и затрат мощности на производство холода на уровне 4,5 К в зависимости от избытка расхода обратного потока. С увеличением избытка обратного потока удельные затраты мощности для дроссельного цикла резко уменьшаются, а для цикла с концевым детандером при примерно 3 % избытка обратного потока удельные энергозатраты на получение холода составляют 270 Вт/Вт, что находится на уровне эффективности многоступенчатых рефрижераторов. Кривые изменения удельной холодопроизводительности на 1 кг/ч подлива жидкого гелия для дроссельного цикла и цикла с концевым детандером, приведённые на рис. 1, дают информацию об условиях их преимущественного применения. Цикл с концевым детандером при минимальных значениях подлива наряду с минимальными затратами энергии на охлаждение обеспечивает высокую холодопроизводительность — до 160 Вт на 1 кг/ч жидкого гелия. В системах, в которых нет каких-либо ограничений по жидкому гелию, но определяющую роль играет высокая надёжность, целесообразно применение простого дроссельного цикла, который может обеспечить холодопроизводительность 55 Вт на гелиевом уровне температур при увеличении подлива жидкого гелия на 1 кг/ч.

Приведённые оценки характеристик циклов подтверждаются интегральными значениями эффективности трёх вариантов рефрижераторов: детандерного многоступенчатого, дроссельного и с концевым детандером с избыточным обратным потоком. Результаты сравнения приведены на рис. 2 в форме кривых удельных затрат энергии на производство холода N в функции от относительной нагрузки Q . Многоступенчатый рефрижератор, как видно из рис. 2, в расчётной точке имеет минимальное значение $N=250$ Вт/Вт. Однако при отклонениях нагрузки на ± 10 % от проектной удельные затраты энергии увеличиваются до 300-350 Вт/Вт. В отличие от этого циклы с избыточным обратным потоком, проигрывая по эффективности в расчётной точке, имеют весьма пологие характерис-

тики и за пределами узкой зоны в окрестности расчётной точки превосходят по эффективности многоступенчатый рефрижераторный цикл. Учитывая отмеченную выше специфику криостатируемых объектов, преимущества циклов с избыточным обратным потоком по их интегральной эксплуатационной эффективности становятся совершенно очевидными.

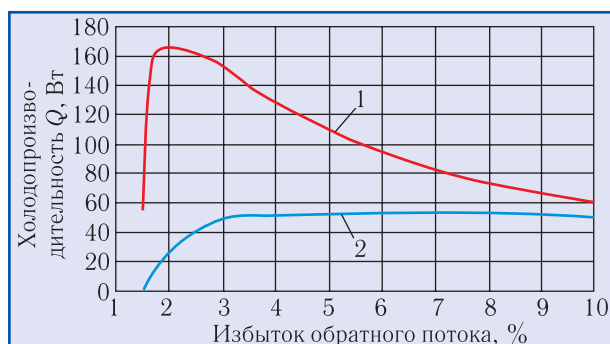


Рис. 1. Удельная холодопроизводительность Q на 1 кг/ч подлива в функции от избытка обратного потока: 1 — цикл с концевым детандером; 2 — дроссельный цикл

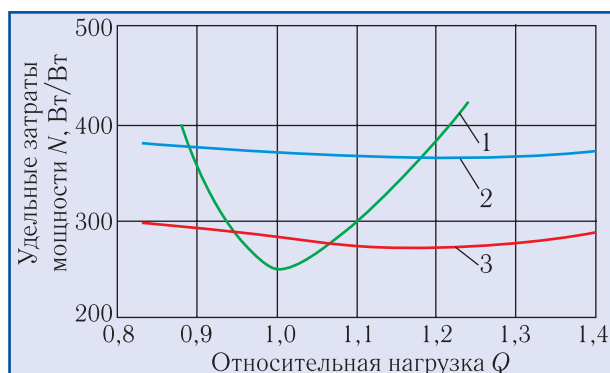
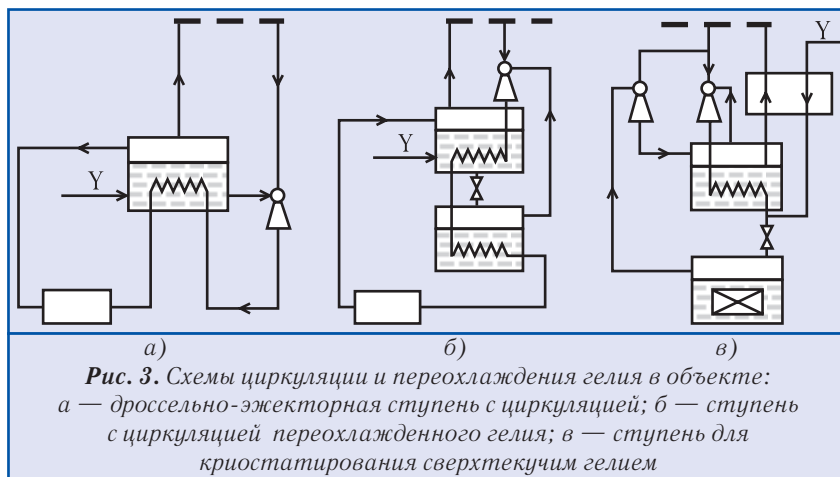


Рис. 2. Зависимость удельных затрат мощности N на охлаждение от относительной нагрузки Q рефрижераторов: 1 — многоступенчатый; 2 — дроссельный; 3 — с концевым детандером

Для циркуляционных систем криостатирования применение многоступенчатых детандерных рефрижераторов весьма проблематично вследствие прямого влияния быстроменяющихся характеристик объекта на режим работы рефрижератора. Дроссельно-эжекторная ступень рефрижератора с избыточным обратным потоком позволяет использовать двухконтурную систему, в которой контуры криогенерации и криостатирования разделены и колебания нагрузки объекта практически не сказываются на работе рефрижератора. Кроме того, применение эжектора позволяет осуществлять циркуляцию гелия и криостатирование объекта при температурах меньше 4,5 К. На рис. 3 приведены схемы с использованием эжекторов для обеспечения циркуляции и уменьшения температурного уровня криостатирования ниже 4,5 К. В схеме, представленной на рис. 3,а, эжектор совмещает в себе роль циркуляционного насоса и концевой ступени рефрижератора. При этом общий расход гелия через объект в 3-4 раза превосходит расход в рефриже-



раторном цикле. Во второй схеме (см. рис. 3,б) помимо этого эжектор обеспечивает откачку нижней ванны, что делает возможным переохлаждение гелия и снижение температурного уровня объекта. В третьей схеме, показанной на рис. 3,в, две ступени эжекторной откачки двух ванн и подлив жидкого гелия обеспечивают криостатирование объекта на температурном уровне 1,8 К.

Альтернативой этим простым и достаточно эффективным решениям является применение циркуляционного насоса для организации потока через объект и вакуум-насоса или холодного компрессора для снижения температурного уровня криостатирования. Однако машинные способы решения проблемы помимо присущих им элементов более низкой надёжности вносят в систему на самом низком температурном уровне теплоту, эквивалентную работе сжатия, что дополнительно снижает термодинамическую эффективность системы.

3. ЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МНОГООРУПЕНЧАТЫХ ОЖИЖИТЕЛЕЙ И РЕФРИЖЕРАТОРОВ

Для ожижителей гелия и рефрижераторов с несколькими ступенями охлаждения, работающих в составе систем криостатирования объектов с переменной нагрузкой, важным вопросом является регулирование холодопроизводительности. Используемые для этой цели системы управления и регулирования основаны на достаточно сложных алгоритмах, охватывающих регулирование компрессоров и турбодетандеров. При применении компрессоров объёмного действия, например, винтовых маслозаполненных, привлекательной выглядит идея регулирования их массовой производительности за счёт изменения давлений гелия на всасывании.

Винтовые маслозаполненные машины подобного типа для сжатия гелия разработаны и выпускаются японской фирмой «Mucot». Предельное давление нагнетания для этих машин составляет 2,6 МПа, давление всасывания для двухступенчатых компрессоров — 0,105-0,2 МПа, а одноступенчатых — 0,15-0,4 МПа. Объёмная производительность ряда компрес-

соров этого типа лежит в диапазоне 2,5-130 м³/мин. Степень повышения давления в одноступенчатых машинах поддерживается постоянной в интервале 7,5-10. Компрессоры комплектуются системой автоматического управления золотником, позволяющим поддерживать массовую производительность в пределах 10-100 % от номинала. В компрессорах исключены утечки гелия, что для каждой машины подтверждается испытаниями с погружением в ванну с жидкостью.

Возможности винтовых маслозаполненных компрессоров «Mucot» с повышенным давлением на всасывании привлекли наше внимание в 2000 г. при разработке гелиевого рефрижератора ОГ-300 холодопроизводительностью 7500 Вт на водородном уровне температур для Департамента атомной энергии Индии. Однако в условиях разветвлённой и связанной с объектом гелиевой системы, замкнутой на компрессор, потребовалось дополнительно к системе внутреннего управления компрессором разработать систему внешнего регулирования процесса поддержания давлений гелия в линиях всасывания и нагнетания. По согласованию с фирмой «Mucot» нами была создана в составе установки ОГ-300 система внешнего регулирования, автоматически поддерживающая в заданных пределах давления всасывания и нагнетания при постоянной степени повышения давления в компрессоре.

Изложение системы регулирования во всей полноте схемных решений блока газообеспечения было бы чрезмерно громоздким. Кратко следует отметить, что основу системы составляют две пары специальных регуляторов с необходимой обвязкой, ресивер высокого давления, обратный клапан с датчиком перепада давления и связанный с ним регулирующий клапан. Первая пара регуляторов поддержания максимального давления на всасывании и нагнетании связана с ресивером и работает в режиме максимальной тепловой нагрузки. Вторая пара регуляторов настроена на более низкие значения давлений всасывания и нагнетания, характерные для пониженной производительности. Регулятор поддержания давления на нагнетании включён параллельно компрессору и при необходимости перепускает поток высокого давления в линию всасывания. Регулятор поддержания давления на всасывании соединён с ресивером и последовательно на линии всасывания — с обратным клапаном, оснащённым датчиком перепада давления. В случае повышения давления на всасывании и закрытия обратного клапана по сигналу датчика перепада давления открывается регулирующий клапан для сброса гелия из линии нагнетания в ресивер, что восстанавливает давление во всасывающей линии.

В проект рефрижератора ОГ-300 были заложены варианты схемно-конструктивных решений системы регулирования, которые обрабатывались во время

пуско-наладочных работ. В результате длительных эксплуатационных испытаний была полностью подтверждена правильность выбранного способа реализации регулирования при любых режимах работы. На способ криостатирования был получен патент РФ [8]. Краткое описание рефрижератора ОГ-300 содержится в работах [9,10].

Отличительная особенность работы установки — поддержание постоянных степени повышения давления в компрессоре и степеней расширения в турбодетандерах. При этом массовый расход гелия в цикле изменяется в соответствии с необходимой холодопроизводительностью при неизменных объёмных расходах, КПД компрессора и турбодетандеров и следовательно удельного расхода энергии на производство холода. В установке ОГ-300 в режиме максимальной тепловой нагрузки компрессор работает в диапазоне давлений 0,35-2,5 МПа с расходом 850 кг/ч. При снижении тепловой нагрузки примерно на 50 % диапазон давлений составляет 0,22-1,5 МПа при расходе гелия 500 кг/ч.

Таким образом, использованное техническое решение позволяет эффективно регулировать холодопроизводительность криогенных установок в широком диапазоне без усложнения конструкции компрессоров и турбодетандеров и с сохранением максимальных значений КПД. Сопоставление с характером кривой 1 на рис. 2 убеждает нас в кардинальном отличии нового способа регулирования от традиционного.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За прошедшие четыре десятилетия в ОАО «Криогенмаш» накоплен значительный фактический материал об исследованиях и разработках гелиевых систем криогенного обеспечения, а также опыт их эксплуатации в составе экспериментальных комплексов для фундаментальных исследований физических и энергетических проблем. Создан ряд крупных систем для таких объектов, как термоядерные реакторы «Токамак-7», «Токамак-15» Института атомной энергии им. Курчатова, магнитогидродинамические установки Института высоких температур АН СССР, сверхпроводящие кабели СПК-100 и ГСПК-50 Энергетического института им. Кржижановского и ВНИИ кабельной промышленности, ускоритель ВЭПП-4 Института ядерной физики (г. Новосибирск), ускорительно-накопительный комплекс УНК-3000 и завод по испытанию магнитных систем Института физики высоких энергий (г. Протвино) и др. [7].

В процессе выполнения этих работ сформировалась концепция построения систем криогенного обеспечения объектов криостатирования со сложным характером сочетания тепловых нагрузок, режимов эксплуатации в условиях импульсных тепловыделений. Концепция базируется на следующих принципах:

- применение высокоэффективных детандерных ожижителей и рефрижераторов гелия с использованием специальной системы регулирования производительности методом изменения массового расхода через компрессор при сохранении объёмного расхода;
- применение рефрижераторов с избыточным обратным потоком, образующимся за счёт подлива жидкого гелия из коллектора ожижителя;
- применение двухконтурных систем криостатирования объекта с использованием эжекторов для организации циркуляции через объект переохлажденного гелия.

С глубоким почтением авторы посвящают настоящий обзор труду, таланту и достижениям предшествующих поколений ОАО «Криогенмаш».

ЛИТЕРАТУРА

1. Криогенные гелиевые системы и установки/ **И.Ф. Кузьменко, И.М. Морковкин, К.В. Безруков, Г.Ю. Цфасман**// Сб. научных трудов ОАО «Криогенмаш» — Юбилейный выпуск. — М.: ОАО «Криогенмаш», 1999. — С. 47-57.
2. **Капица П.Л.** Расчёт гелиевого ожижительного цикла с каскадным включением детандеров// Журнал технической физики. — 1959. — Т.29. — № 4. — С. 427-432.
3. Криогенные системы: В 2-ух т. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем/ **А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др.**; Под общ. ред. **А.М. Архарова** и **А.И. Смородина**. — М.: Машиностроение, 1999. — 720 стр.
4. **Кузьменко И.Ф.** К вопросу о расчёте гелиевого холодильного цикла с каскадным включением детандеров// Известия высших учебных заведений. Энергетика. — 1964. — № 9. — С. 95-99.
5. Авторское свидетельство СССР № 1023878. Способ криостатирования объекта. МКИ F25 В 9/00.
6. Совершенствование схем криогенных гелиевых систем для криостатирования сверхпроводящих устройств/ **В.П. Беляков, А.П. Иньков, В.Д. Коваленко, И.М. Морковкин**// Химическое и нефтяное машиностроение. — 1980. — № 7. — С. 5-7.
7. **Беляков В.П.** Криогенная техника и технология. — М.: Энергоиздат, 1982. — 272 с.
8. Патент РФ №2241524. Способ криостатирования объекта с переменной тепловой нагрузкой и устройство для его осуществления. МКИ 7F25B 9/06.
9. **Кузьменко И.Ф., Морковкин И.М., Гуров Е.И.** Концепция создания ожижителей водорода средней производительности с гелиевым холодильным циклом// Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2004. — № 2. — С. 22-24.
10. Опыт создания крупномасштабного оборудования для получения, хранения и транспортирования жидкого водорода/ **И.Ф. Кузьменко, И.М. Морковкин, Г.И. Сайдадь и др.**// Технические газы. — 2009. — № 2. — С. 31-37.