

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В.Н. Кеменов, С.Б. Нестеров

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

Учебное пособие
по курсу
«Криовакуумная техника»
для студентов ИТТФ и ЭТФ МЭИ (ТУ) и МИЭМ (ТУ)

УДК
621.5
К-35
УДК: 621.52 (075.8)

Утверждено учебным управлением МЭИ в качестве учебного пособия для студентов.

Подготовлено на кафедре низких температур

Рецензенты: докт.техн.наук, проф. МАТИ (РГТУ) В.В. Слепцов,
докт.техн.наук, проф. МЭИ (ТУ) А.М. Гуляев

КЕМЕНОВ В.Н., НЕСТЕРОВ С.Б.

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ: –М.: Издательство
МЭИ, 2002. – 84 с.
ISBN 5-7046-0840-X

Представлено описание основных областей применения вакуумной техники и технологии и краткую историю развития вакуумной техники в России.

Для студентов ИТТФ, ЭТФ МЭИ (ТУ) и МИЭМ (ТУ), обучающихся по специальностям «Техника и физика низких температур» (070200) и «Электронное машиностроение» (200500)

ВВЕДЕНИЕ

Мировая история средств откачки берет свое начало в 1642 г. с известных опытов Отто фон Герике с Магдебургскими полушариями, для откачки воздуха из которых он использовал обычный пожарный насос, герметизированный с помощью помещения в водяную ванну.

С тех пор средства получения вакуума прошли длительный путь развития вплоть до создания современных промышленных образцов, основанных на различных принципах действия, и охватывающих широкий диапазон создаваемых давлений от атмосферного до 10^{-13} мм рт. ст. и ниже.

В рамках учебного пособия невозможно детально проследить всю историю мирового развития технических средств откачки. Основные этапы их развития за рубежом освещены в различных монографиях, статьях и обзорах. Практически не освещена отечественная история средств откачки, которая несомненно представляет познавательный интерес для отечественных специалистов – вакуумщиков, историков техники и студентов. Поэтому авторы сочли необходимым в данном издании включить главу, посвященную истории развития вакуумной техники в России.

Вакуумная и криогенная техника во многом определяют прогресс мировой науки и техники.

В работе рассматриваются примеры применения вакуумных технологий в металлургии, химии, нефтехимии, химическом машиностроении, электротехнике, энергетике, угледобывающей и горнорудной промышленности, электрофизическом аппаратостроении, космонавтике, авиации, научном приборостроении и т.д.

1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ОТКАЧКИ В РОССИИ

Отечественную историю развития средств откачки можно условно разбить на три периода:

Первый – период становления, охватывающий промежуток времени до второй мировой войны, связанный с использованием вакуума в научных исследованиях, с появлением и развитием отечественной электровакуумной промышленности: производством ламп накаливания, радиоэлектронных ламп, рентгеновских трубок и т.д.

До начала 30-х годов двадцатого столетия основными средствами получения вакуума в стране были ртутные насосы Тендера и Ленгмюра, изготавливавшиеся в стеклодувных мастерских лабораторий и заводов, а также насосы, покупавшиеся за рубежом. В 1912 г. профессором Петербургского университета Боровиком был изобретен диффузионный парортутный насос.

С середины 30-х годов до начала второй мировой войны в Харьковском физико-техническом институте были проведены работы по созданию первого отечественного вакуумного масла с низкой упругостью пара 10^{-5} мм рт. ст. и первых отечественных паромасляных фракционирующих диффузионных насосов с быстротами действия от 40 до 1000 л/с.

Второй – период становления и стремительного развития откатной вакуумной техники, охватывающий промежуток времени с 1945 г. до середины 60-х годов.

Этот период, явившийся периодом "Ренессанса" в вакуумной технике, был связан с научно-технической революцией, вызванной развитием военной техники и распространившейся на все области промышленности, техники и науки. Именно в этот период была заложена научная, техническая и промышленная база откатной вакуумной техники, дальнейшее совершенствование и развитие которой продолжалось в *третий* период, начиная с середины 60-х годов до настоящего времени.

1945–1947 гг. Основной потребитель вакуумной техники, как и в довоенные годы – электровакуумная промышленность. В 1945 г. организована Центральная вакуумная лаборатория (ЦВЛ), которая возглавлялась будущим академиком С.А. Векшинским. Для нужд электровакуумного производства создаются первые промышленные отечественные вакуумные насосы: форвакуумные ВН-494, ВН-461 и РВН-20, диффузионный ЦВЛ-100 с быстротой действия 100 л/с. Разрабатываются специальные вакуумные масла для насосов: вазелиновое ВМ-4 для механических насосов, вазелиновое Д1, октойли ОФ и ОС для диффузионных.

1947–1950 гг. Бурный рост работ в области атомной техники, организация производства атомного горючего потребовали создания целого комплекса вакуумного оборудования, качественно и количественно совершенно не похожего на то, что имелось в стране до этого.

В 1947 г. для этой цели на базе ЦВЛ организован Научно-исследовательский вакуумный институт (НИВИ), ныне НИИВТ им. С.А. Векшинского [1, 2]. В этот период создается диффузионный насос Н-20Т с быстротой действия 20000 л/с – один из крупнейших по тем

временам насос в мире, который еще долгие годы после его создания оставался уникальным по производительности насосом. Разрабатывается первый промышленный образец паромасляного бустер-насоса с быстротой действия 500 л/с БН-3 и создается специальное бустерное масло – масло "Г". На базе этих насосов создается первый в стране высоковакуумный откачной агрегат Н-205. Уже в те далекие годы были разработаны многие элементы оборудования явившиеся прообразами современных конструкций вакуумной техники: азотные и фреоновые ловушки, вакуумные запорные вентили, натекатели, затвор шиберного типа, сорбционные насосы для откачки хлора - хлоропоглотители. Уже тогда были опробованы первые конструкции внутренних нагревателей в паромасляных насосах. В содружестве с работниками КБ Московского завода им. Владимира Ильича разрабатываются крупные по тем временам механические насосы ВН-2, ВН-1 ж ВН-4 с быстротами откачки от 6 до 50 л/с. Знаменательным событием того периода, сыгравшим решающее значение для всего последующего развития вакуумной техники явилась организация промышленного производства откачного вакуумного оборудования на заводе им. Владимира Ильича.

В ХФТИ продолжают работы по наследованию и совершенствованию диффузионных насосов. Разрабатываются насосы М-20 и М-4 с быстротами действия 20000 и 40000 л/с. И.М. Лившицем и Л.Н. Розенцвейгом предлагается приближенная теория диффузионного насоса.

1951–1956 гг. Промышленный выпуск вакуумного оборудования на заводе им. Владимира Ильича способствовал освоению вакуум-технологических процессов в различных отраслях промышленности. Потребность в вакуумном откачном оборудовании возрастает. Появляются новые требования к нему. Возникает необходимость откачивать конденсируемые пары и парогазовые смеси, приведшая к разработке газобалластных устройств к насосам ВН-1, ВН-2, ВН-4, ВН-6. Разработанные устройства позволили обеспечить удовлетворительную откачку паров воды при впускном давлении –5 мм рт. ст. форвакуумными насосами с быстротами действия от 6 до 150 л/с. Разрабатывается первая унифицированная серия высоковакуумных паромасляных насосов Н-ИС, Н-5С, Н-5Т, Н-8Т с быстротами действия от 100 до 8000 л/с. Насосы подобны по конструкции и характеристикам. Рабочий диапазон создаваемых давлений 10^{-6} – 10^{-4} мм рт. ст., наибольшее выпускное давление 0,1 мм рт. ст. На базе насосов создается серия высоковакуумных агрегатов ВА-01-1; ВА-0,5-1; ВА-2-3; ВА-5-4; ВА-8-4, оснащенных азотными ловушками и затворами.

Создание унифицированной серии высоковакуумных паромасляных насосов и агрегатов и серии газобалластных форвакуумных насосов различной производительности явилось важной вехой в дальнейшем внедрении вакуума в различные технологические процессы приборо- и аппаратостроения: в качественную металлургию, электронику, нефтехимию, масс-спектрометрию, ускорительную технику и др.

Развитие ускорительной техники и техники получения редких и активных газов стимулирует начало работ по созданию парортутных насосов и агрегатов. Создаются насосы Н-5Р, Н-40Р, Н-1ТР с быстротами действия от 5 до 1000 л/с, уникальный насос с выхлопом в атмосферу ЭПРН-760, не имеющий и до сего времени аналогов за рубежом. Разрабатываются герметичные механические насосы НВГ-1, НВГ-2, НВГ-3 для откачки редких и радиоактивных газов.

Развитие производства вакуумного оборудования и необходимость его расширения приводит к передаче производства вакуумной техники с завода им. Вл. Ильича на Московский з-д "Компрессор".

В 1950–51 гг. Б.Г. Лазаревым и Е.С. Боровиком в ХФТИ [3] выполнены первые работы по исследованию процесса криосорбционной откачки и разработан первый заливной криосорбционный гелиевый насос ВК-4.

В 1954 г. В.И. Скобелкиным и Н.И. Юенковой предложена теория диффузионного насоса, учитывающая реальный механизм работы насоса.

1957–1959 гг. Развитие производства качественных сталей и тугоплавких металлов в вакуумных дуговых и индукционных печах выдвигает задачу создания высокопроизводительных насосов, работающих в области давлений 10^{-1} – 10^{-4} мм рт. ст. Для этой цели разрабатываются паромасляные бустер-насосы БН-1500, БН-1500-2, БН-4500 и БН-15000 с быстротами действия от 1500 до 15000 л/с, с диапазоном рабочих давлений 10^{-2} – 10^{-4} мм рт. ст. Необходимость откачки больших количеств воздуха выдвигает задачу создания для бустер-насосов термоокислительно стойких рабочих жидкостей. Разрабатываются стойкое нефтяное масло ВМ-3 и кремнийорганическая жидкость ПФМС-1.

Наряду с паромасляными насосами разрабатываются механические бустер-насосы на основе конструкции двухроторных воздуходувок Рутса-насосы ДВН-500 и ДВН-1500. Производство насосов организуется на Мелитопольском компрессорном заводе.

Дальнейшее развитие электровакуумного производства, потребность в небольших широкодиапазонных высоковакуумных насосах приводит к созданию диффузионных насосов Н-005 и НВО-40. Насос

Н-005 совмещал в себе свойства высоковакуумного и бустерного насосов, работая в области давлений 10^{-6} - 10^{-2} мм рт. ст. и обладая высоким значением наибольшего выпускного давления 4 мм рт. ст. Эти характеристики наряду с высокой термоокислительной стойкостью разработанных для него кремнийорганических жидкостей ПФМС-2 и ВКЖ-94 делали его удобным для оснащения автоматов откачки электровакуумных приборов. Насос НВО-40 с воздушным охлаждением предназначался для оснащения подвижных линий откачки электровакуумных приборов. Им были оснащены также гелиевые течеискатели ПТИ.

Расширение работ в области ускорительной техники и начало работ в области управляемых термоядерных реакций потребовало создания высокопроизводительных паротурбинных насосов и сверхвысоковакуумных агрегатов на их основе. Были разработаны насосы Н-5СР, Н-6ТР с быстротами действия 500 и 6000 л/с, агрегаты РВА-05-1, ВА-2-1, РВА-6-1, РВА-05-2, с предельным вакуумом 10^{-6} мм рт. ст. и прогреваемые агрегаты РВА-0,54 и РВА- 1-3 с предельным вакуумом 10^{-10} мм рт.ст. На агрегате РВА-0,5-4 в результате специальных исследований и разработанных мероприятий удалось получить предельный вакуум 10^{-13} мм рт. ст., наиболее низкий из когда-либо достигнутых для пароструйных насосов. Разрабатываются сверхвысоковакуумные прогреваемые паромасляные насосы ВА-05-5 и ВА-8-9М на базе насосов Н-5С и Н-8Т с предельным вакуумом $5 \cdot 10^{-9}$ мм рт. ст.

1960–1965 гг. Итак, к 1960 г. был создан уже целый комплекс различного откачного вакуумного оборудования, обеспечивающего получение низких давлений от 760 до 10^{-13} мм рт. ст. Однако производство оборудования было рассредоточено на ряде неспециализированных заводов: Компрессоре, Ливгидромаше, Мелитопольском и других, что затрудняло обеспечение технического прогресса и дальнейшее развитие вакуумной техники. В связи с этим по предложению НИВИ, в 1959 г. решением ЦК КПСС и СМ СССР создается специализированный завод вакуумного оборудования в Казани - Казмехзавод с СКБ при заводе, которое в 1961 г. реорганизуется в Центральное конструкторское бюро вакуумной техники (ныне НПО «Вакууммаш»).

Таким образом, начало 60-х годов знаменательно созданием комплекса специализированных вакуумно-технических производственных организаций - НИВИ, ЦКБ-ВТ и Казмехзавода. В это же время строится цех для производства высокопроизводительных механических насосов на Сумском насосном заводе. В результате проведенных мероприятий уже в 1962 г. производство вакуумного откачного оборудования в стране достигло объема 33,5 тыс. единиц. Таким образом, в стране

была организована научная и производственная база вакуумной техники, которая создала условия для дальнейшего бурного развития вакуум-технологических процессов, вакуумного аппарата- и приборостроения в различных отраслях промышленности и техники. Уже к середине 60-х годов вакуум использовался в той или иной мере практически во всех отраслях промышленности.

Для развития вакуумной техники первая половина 60-х годов характерна качественными сдвигами – появлением принципиально новых видов откачного оборудования, не использующего для своей работы вакуумных масел.

Так, для обеспечения безмасляного вакуума в установках для термоядерных исследований, а затем и для откачки особо надежных изделий электронной техники создается ряд электрофизических и физико-химических средств откачки. Разрабатывается группа сорбционно-ионных насосов типа СИН с производительностями 2000, 5000 и 20000 л/с, работающих на принципе поглощения газов титаном, распыляемым из жидкой капли электронной бомбардировкой при постоянной ионизации газа встроенным ионизатором. На базе насоса СИН-20 создается уникальный по своим характеристикам агрегат АВТО-20М, в котором распыляемый титан конденсируется на поверхности, охлаждаемой жидким азотом. Агрегат позволяет получать быстроту действия по водороду 30000 л/с и предельный вакуум 10^{-12} мм рт. ст.

Высокая интенсивность испарения титана жидкофазными испарителями при малом потреблении мощности позволяет создать автономные электронно-лучевые испарители со скоростью испарения титана до 1,5 г/мин для откачки термоядерных установок. Использование этих испарителей в термоядерной установке "Огра" позволило успешно решить проблему создания скоростей откачки установки около миллиона л/с.

Однако наличие высокого напряжения и накаливаемого катода, а также механизмов подачи титановой проволоки в испарителях насосов типа СИН существенно сужали возможности широкого применения насосов.

Работы НИВИ в области получения иодидного титана позволили создать в начале 60-х годов не имеющие аналогов за рубежом прямонакальные испарители на основе иодидного титана, нанесенного на молибденовый стержень. Несмотря на меньшие скорости испарения, в сравнении с жидкофазными испарителями, эти испарители просты в эксплуатации, не содержат механизмов, не требуют высокого напряжения для работы. На базе этих испарителей был разработан ряд сорбци-

онно-ионных или, как их теперь называют, "геттерно-ионных насосов" типа ГИН с производительностями от 5 до 50000 л/с, с предельным вакуумом 10^{-9} мм рт. ст. Основной недостаток геттерно-ионных насосов – малый срок непрерывной работы и наличие накаливаемых деталей.

Свободны от этих недостатков магниторазрядные насосы, работающие на принципе распыления титана в высоковольтном разряде Пеннинга. С 1960 по 1964 гг. разрабатывается серия диодных магниторазрядных насосов типа НЭМ с быстротами действия от 30 до 6500 л/с: НЭМ-30-2, НЭМ-100-2, НЭМ-300-1, НЭМ-1Т-1, НЭМ-2-5Т-1, НЭМ-7Т-1. Насосы позволяют получать предельный вакуум 10^{-10} мм рт. ст. при давлении 10^{-2} мм рт. ст. ГИН и НЭМ находят все возрастающее применение в электронной промышленности, в ускорительной технике, в физических лабораториях. Производство их организовывается на заводе в г. Калининграде (ныне ПО "Кварц").

Комплекс работ по безмасляным средствам откачки в этот период завершается разработкой ряда сорбционных цеолитовых насосов и агрегатов, предназначенных для предварительной форвакуумной откачки систем с геттерно-ионными магниторазрядными насосами от 760 до 10^{-2} – 10^{-4} мм рт.ст.-(насосы ЦВН-0,1-2, ЦВН-1-2, агрегаты ЦВА-0,1-1, ЦВА-0,1-2, ЦВА-1-1, ЦВ-1-2). На базе магниторазрядных и цеолитовых насосов создается ряд безмасляных откачных агрегатов типа "Эра": Эра-30-2, ЭРА-100-2, ЭРА-300-2 с быстротами действия от 25 до 250 л/с, с предельным вакуумом 10^{-10} мм рт. ст.

В начале 60-х годов совместно с ЦКБ-ЭФП разрабатывается первый отечественный сверхвысоковакуумный турбомолекулярный насос ТВН-200 с предельным вакуумом 10^{-9} мм рт. ст. и быстротой действия 250 л/с и агрегат на его основе ТВА-200. Позднее разрабатываются турбомолекулярные насосы ТВН-500, ТВН-2000 и ТВН-5000 и агрегаты на их основе.

Начавшиеся еще в конце 50-х годов работы по промышленному освоению метода вакуумной дегазации жидких сталей требовали создания насосов с быстротой действия в десятки и сотни тысяч л/с при давлениях 0,5–1 мм рт. ст. Эта задача решалась созданием ряда высокопроизводительных парожеткаторных насосов с быстротой действия до 150000 л/с. Были созданы уникальные парожеткаторные насосы с быстротами действия 10000 и 20000 л/с при давлении 10^{-2} мм рт. ст.

В 1963–1965 гг. в НИВИ выполнены оригинальные исследования и разработаны действующие модели так называемых холодных диффузионных насосов, рабочие струи которых создавались углекислым газом, а механизм действия основывался на откачке удаляемого

воздуха при конденсации углекислого газа на стенке, охлаждаемой жидким азотом. Подводя итог работам рассматриваемого второго периода, можно отметить, что к концу 1965 г. отечественная вакуумная техника располагала практически всеми известными видами откачного вакуумного оборудования.

Становление и дальнейшее развитие отечественной микроэлектроники во многом определило тематическую направленность работ в области вакуумной техники.

Вакуумные технологии стали определяющими во всем цикле изготовления интегральных схем (ИС). Получение сверхчистых металлов и полупроводниковых материалов, выращивание ленточных монокристаллов, молекулярно-лучевая эпитаксия, получение тонких пленок полупроводниковых материалов и металлов, ионно-плазменное и плазмохимическое травление рабочих материалов, ионная имплантация, радиационная обработка, электронная и ионная литография и другие – далеко не полный перечень вакуумных процессов в технологии производства ИС. Из примерно 200 операций современной технологии изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС) 160 осуществляют в вакууме.

Широким фронтом были развернуты работы по исследованию и разработке технологических процессов и оборудования ионной имплантации. В 1968–69 гг. была создана первая универсальная установка ионной имплантации «Везувий-1» и освоено её серийное производство. Направление ионной имплантации становится одним из основных ведущих тематических направлений. С начала 70-х годов ведутся систематические исследования и разработки оборудования ионной имплантации для производства различных изделий микроэлектроники, в результате которых был создан целый ряд автоматизированных установок «Везувий» различного направления (от «Везувий-1» до «Везувий-16»).

В 70-е годы было создано оборудование для радиационно-стимулированной и протонной обработки полупроводниковых структур, а в начале 80-х годов – установка электронного отжига «Викинг».

С начала 70-х годов выполняется широкий комплекс исследований и разработок, связанных с созданием ионно-плазменных методов осаждения и травления тонких плёнок. В результате этих работ был создан ряд оригинальных, не имеющих аналогов в мире, холодных ионных источников с практически неограниченным сроком службы типа «Радикал», «Холодок». На базе этих источников создана целая гамма установок для ионно-лучевого и реактивного ионно-лучевого травления и осаждения тонких плёнок.

Наряду с ионно-лучевыми источниками разработан ряд источников ионов магнетронного типа МАГ-5, МАГ-15, МАГ-50 и других. и оборудование на их основе.

Разработанные технологические процессы и оборудование ионной и ионно-химической обработки позволили исключить жидкостные процессы в производстве интегральных схем и полупроводников и впервые реализовать в промышленности полностью сухой цикл изготовления изделий микроэлектроники с субмикронными размерами элементов, создать и освоить производство принципиально новых классов приборов твердотельной электроники: импульсных и малошумящих кремниевых и арсенид-галлиевых транзисторов, приборов дифракционной оптики, ПАВ СВЧ-диапазона и др. Это был революционный переворот в технологии микроэлектроники, открывший возможность создания полностью автоматизированных, экологически чистых технологических линий производства интегральных схем и полупроводников.

Процессы ионно-лучевой обработки находят в последние годы все более широкое применение в промышленности для очистки и активации поверхности при осаждении плёнок, для прецизионного полирования поверхности, для осаждения плёнок непосредственно из пучков ионов в технологических процессах нанесения тонкопленочных проводящих и диэлектрических покрытий, алмазоподобных плёнок, плёночных композиций и др.

Развитие плёночной тематики привело к разработке вакуумно-дуговых методов нанесения металлических покрытий на диэлектрические и металлические изделия. Вакуумно-дуговая металлизация отличается высокой производительностью, возможностью наносить любые металлы и сплавы при сохранении их состава, широким диапазоном толщин наносимых плёнок; большой прочностью сцепления плёнки с подложкой, малой энергоёмкостью, возможностью наносить покрытия на изделия любой формы и любых размеров. На базе плазменно-дуговых источников создано оборудование для плазменно-дугового нанесения покрытий. Созданные технологии и оборудование позволяют кардинально решить важнейшую проблему замены в различных производствах экологически вредных мокрых процессов электрохимической гальваники на абсолютно экологически чистые процессы. Были разработаны и внедрены в производство экологически чистые процессы плазменно-дугового нанесения покрытий в производстве миниатюрных бесконтактных и прецизионных резисторов, пьезокерамических элементов для систем гидроакустики без традиционного применения серебра, выводных рамок ИС с металлизацией алюминием вместо золота и др. изделий.

Развитие микроэлектроники, решение задачи создания СБИС с субмикронными размерами элементов потребовало создания принципиально нового литографического оборудования.

В конце 70-х годов проводятся исследования и разработка электронно-литографического оборудования. Установка электронной проекционной литографии «Вертикаль» явилась первой отечественной промышленной установкой этого класса оборудования. Позднее в 80-х годах разворачиваются работы по исследованию и разработке оборудования ионной и рентгеновской литографии, позволяющих перейти к формированию структур СБИС с размерами элементов около 1 мкм. В это же время выполняются разработки компактного источника синхротронного рентгеновского излучения (СРИ) с диаметром накопительного кольца 2,2 м и 21 каналом вывода СРИ.

На базе разработанных вакуумно-технологических процессов и оборудования для нанесения и травления слоев, ионной имплантации, электронной литографии и новейшей вакуумной техники в 1985 г. была создана первая в стране интегрированная автоматическая линия, предназначенная для изготовления сверхбольших интегральных схем запоминающих устройств на ЦМД. Это был поистине революционный скачок в развитии технологии и техники микроэлектроники. Только через много лет после этого в мировой практике появились установки-кластеры аналогичного назначения.

Владение современной технологией изготовления СБИС и наличие комплекса необходимого вакуумно-технологического оборудования позволили решить в середине 80-х годов важнейшую проблему создания СБИС 3У на ЦМД на 1 и 4 Мбит. Таким образом, был реализован полный цикл создания СБИС от идеи до готового прибора, включая разработку технологии, оборудования и приборов.

Разработка различного оборудования, основанного на ионных методах обработки, позволила выдвинуть новую революционную задачу создания интегрированной ионной технологии и многоцелевой установки ионной обработки, реализующей все этапы изготовления СБИС в едином вакуумном цикле. Технологический процесс такой обработки получил название «имплантографии» — технологии будущего.

Развитие электронной промышленности, в особенности микроэлектроники, выдвинуло задачи дальнейшего развития и совершенствования элементной базы вакуумной техники.

Были разработаны новые средства откачки:

- форвакуумные механические насосы с масляным уплотнением, предназначенные для откачки агрессивных газов, установки для очистки масла в насосах;
- агрегат в химостойком исполнении на базе двухроторного и форвакуумного насоса;
- диффузионные насосы с воздушным охлаждением, укороченные серии диффузионных насосов;
- турбомолекулярные насосы на шарикоподшипниковых опорах с циркуляцией смазывающего масла, с консистентной смазкой подшипников и с магнитными опорами ротора;
- криогенные насосы заливные и с газовыми микрокриогенераторами;
- магниторазрядные и испарительные геттерноионные насосы, комбинированные магниторазрядные насосы, в том числе уникальные микронасосы магниторазрядные и геттерноионные, предназначенные для встраивания в ЭВП.

Разработан целый ряд рабочих жидкостей для вакуумных насосов: минеральных и синтетических, в том числе химостойких для диффузионных и механических насосов, сверхвысоковакуумных для диффузионных насосов, специальных жидкостей для турбомолекулярных насосов.

Значительное развитие получила вакуумметрическая и течеискательная техника. Разработаны и освоены в производстве мембрано-емкостные вакуумметры ВД-1 и ВД-2, измерения которых не зависят от рода контролируемого газа, тепловые, ионизационные и магниторазрядные вакуумметры и преобразователи давления, в том числе: терморезисторный, блокировочный вакуумметр 13 ВТВ-003; образцовый тепловой ВТСО-1 с малой погрешностью измерения $\pm 10\%$; ионизационные блокировочные вакуумметры ВИЦБ-2/7-002 и ВИЦБ-11 с цифровым отсчетом давления; сверхвысоковакуумный ионизационный вакуумметр ВИЦ 9/0-001 с цифровым отсчетом давления, образцовый ионизационный вакуумметр ВИО-1 с погрешностью измерений менее 10%; магниторазрядные блокировочные вакуумметры ВМБ-12, ВМБ-14, ВМБЦ-12, ВМБ-11 с цифровым отсчетом давления, предназначенные для работы в автоматизированных системах, уникальные, не имеющие аналогов за рубежом самоочищающиеся преобразователи давления ПММ-28, ПММ-38, вакуумметр-течеискатель ВТИ-1 и др.

Революционные изменения произошли и в течеискательной технике. Разработаны и освоены в производстве малогабаритные ге-

лиевые масс-спектрометрические течеискатели ТИ1-14 и ТИ1-15, высокочувствительный течеискательный стенд СВТ-2, усовершенствованные галогенные течеискатели БГТИ-7 и ТИ-2-8, принципиально новые электронно-захватные течеискатели 13ТЭ-9-001 и ТИЭ-2, использующие в качестве пробного вещества элегаз.

Разработана различная запорная и регулирующая вакуумная арматура с ручным и электропневмоприводами как для непрогреваемых, так и для прогреваемых вакуумных систем.

Библиографический список

1. **Уксусов А.С., Цейтлин А.Б.** НИИВТ им. С.А. Векшинского – 45 лет со дня основания // Вакуумная техника и технология. Спб.: 1992. Т.2. № 3,4. С.2–8.
2. **Кеменов В.Н.** Научно-исследовательский институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского накануне 55-летия со дня основания// Сб. докл. 5-го Междунар.симпоз. «Вакуумные технологии и оборудование»/ Под ред. В.И. Лапшина, В.М. Шулаева. Харьков:2002.С. 6.
3. **Лазарев Б.Г.** Истоки криовакуума // Труды Украинского вакуумного общества. Киев. 1995.Т.1.С.20–27.

2. ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ

Развитие практически всех отраслей металлургической промышленности связано с интенсивным использованием вакуумной техники. В металлургии – печей и средств внепечной обработки в технологических процессах, обеспечивающих выплавку высокочистых металлов и сплавов. В порошковой металлургии вакуумная технология находит применение для завершающей стадии компактирования – спекания твердых сплавов, постоянных магнитов и пр. Вакуумные процессы электроннолучевой и термодиффузионной сварки позволяют получать неразъемные соединения приборов, деталей конструкций машин и сооружений в ядерной, автомобильной, электронной и других отраслях промышленности.

2.1. Вакуумная внепечная обработка

Осуществление многих вакуумных технологических операций, таких как дегазация (непрерывная, при нагреве, частичная), раскисление, обезуглероживание и прочее вне печи позволяет расширить воз-

возможности сталеплавильных агрегатов, в частности, кислородных конверторов и мартеновских печей по сортаменту выплавляемого металла, и поставлять новые виды продукции с требуемым химическим составом и свойствами. Процесс выплавки стали в этих агрегатах упрощается и сводится только к расплавлению шихты, удалению вредных примесей, окисных включений, избытка углерода и нагреву металла до заданной температуры.

Одним из эффективных методов повышения качества стали является раскисление стали углеродом в вакууме в связи с возможностью существенного снижения содержания кислорода и получения мелкой дендритной структуры слитков. Развитие реакции обезуглероживания в вакууме широко используется для получения стали с низким содержанием углерода (менее 0.01%), главным образом электротехнических и сталей для эмалирования с односторонним покрытием. Этот процесс позволяет сократить продолжительность дорогостоящего обезуглероживающего отжига стального листа или отказаться от него вообще [1,2].

Порционные и циркуляционные установки внепечного вакуумирования используют для изготовления широкого сортамента нержавеющей стали, содержащих менее 0,02% углерода и хорошо полирующихся и обладающих высокими антикоррозионными свойствами. Например, на установках циркуляционного вакуумирования завода в Рурпорте (Германия) и ОАО "Новолипецкий металлургический комбинат" содержание углерода в металле составило 0,003% [2, 3].

Процесс вакуумной дегазации, т.е. удаление из жидкого металла растворенных в нем газов, обеспечивает не только получение металла с минимальным содержанием вредных примесей, но и способствует улучшению его свойств. В настоящее время вакуумная дегазация широко используется производителями стального листа в автомобилестроении, так как стальные листы достигают при такой обработке повышенного предела текучести [4]. При этом дегазацию жидкого металла во всем его объеме обеспечивает наиболее простой процесс вакуумной обработки в ковше.

К вакуумной внепечной обработке относится вакуумная обработка стали и сплавов в ковше, вакуумирование стали в струе, вакуумирование металла мелкими порциями всасыванием или принудительной циркуляцией металла из ковша в специальный вакуумный резервуар.

Удобной в промышленной эксплуатации оказалась установка для ковшового вакуумирования завода "Днепропецсталь" [5]. Стальная сварная камера цилиндрической формы шарнирно соединена с крышкой, подъем и опускание которой производится с помощью электриче-

ской лебедки. В центре крышки имеется закрывающийся контейнер (дозатор) с открывающимся днищем для введения в ковш различных легирующих добавок и раскислителей. Вакуумная обработка производится при остаточном давлении $3 \cdot 10^3$ – $3.5 \cdot 10^3$ Па.

Эффективность способа вакуумирования стали в ковше может быть увеличена за счет принудительного перемешивания металла при помощи электромагнитного поля [2]. Современные установки для вакуумирования стали в ковше с электромагнитным перемешиванием обеспечивают хорошую дегазацию всего находящегося в ковше металла и равномерное распределение вводимых в ковш раскислителей и легирующих добавок.

Вакуумирование стали в струе применяется для удаления водорода из стали при отливке слитков для крупных поковок. Распространение этого варианта внепечной обработки объясняется сравнительной простотой практического осуществления и высокой скоростью дегазации. В общем случае установка этого типа состоит из вакуумной камеры с изложницей, ковша с металлом, ограничителя разбрызгивания струи, вакуумного затвора и вакуумного насоса. Самые крупные слитки, отливавшиеся в вакууме, имели массу около 400 т и предназначались для роторных валов атомной электростанции [6].

Для вакуумирования в струе слитков относительно небольших размеров применяют метод перелива из ковша в ковш. Порционный и циркуляционный методы вакуумирования отличаются от рассмотренных выше тем, что воздействию вакуума здесь одновременно подвергается только часть металла, засасываемого из обычного сталеразливочного ковша в расположенную над ним вакуум-камеру через всасывающий патрубок, погруженный в металл. Принципиальным различием между этими методами является способ и характер перемещения металла из ковша в вакуум-камеру и обратно.

Для установок внепечного вакуумирования широко применяются парожеткорные вакуумные насосы, представляющие собой агрегаты из нескольких (4–6) последовательно соединенных эжекторов, обеспечивающих в целом скорости откачки и требуемое остаточное давление. Для ускорения откачки системы до рабочего состояния в установках внепечного вакуумирования предусматриваются пусковые эжекторы (один или два), включаемые параллельно основному рабочему насосу. Эти эжекторы способны очень быстро откачать систему до $1 \cdot 10^4$ – $2 \cdot 10^4$ Па, после чего отключаются.

2.2. Вакуумные электропечи

Вакуумные электропечи получили широкое распространение в связи с возникновением таких отраслей промышленности, как атомная, ракетная и пр. Вакуумная плавка металлов и сплавов в печах позволяет значительно снизить содержание газов и количество неметаллических включений, обеспечить высокую однородность и плотность слитка за счет направленной кристаллизации жидкого металла, значительно улучшить физико-механические свойства металла.

По принципу устройства и назначения вакуумные электропечи делятся на следующие типы: дуговые, индукционные, электронно-лучевые и сопротивления.

Вакуумные дуговые печи используются для выплавки качественных сталей – нержавеющей, конструкционных, электротехнических, шарикоподшипниковых; жаропрочных сплавов, тугоплавких и высоко-реакционных металлов. Основные особенности конструкции печи приводятся ниже. Расходуемый электрод крепится на штоке, к которому присоединен отрицательный полюс источника постоянного тока. Шток электрода вводится в вакуумное пространство печи. Между концом электрода и прокладкой поддона кристаллизатора возникает электрическая дуга. Материал электрода под влиянием тепла дуги расплавляется и стекает в кристаллизатор, где затвердевает и из него постепенно формируется слиток. Электрод, служащий одним полюсом дуги, может быть расходуемым и нерасходуемым. Нерасходуемый электрод участвует в процессе только как проводник тока. Другой принципиально отличный тип вакуумной дуговой печи - печь для плавки в гарнисаже, особенностью которой является наличие водоохлаждаемого тигля, заполненного металлом. Стенки тигля покрыты коркой застывшего металла, отделяющего жидкий металл от стенок тигля. Благодаря этой корке (гарнисажу) выплавляемый металл не контактирует с материалом тигля и поэтому не загрязняется им. В плавильном пространстве при помощи системы вакуумных насосов (форвакуумных ротационных и либо бустерных, либо высоковакуумных паромасляных, соединенных последовательно с бустерным) поддерживается давление порядка $10-10^{-1}$ Па [7].

Вакуумные индукционные печи применяются для плавки и разливки различных металлов и сплавов, причем наибольшее распространение получили плавильные печи с наклоняемым тиглем внутри стационарного кожуха [7, 8]. Принцип работы печей заключается в том, что в огнеупорном тигле, установленном в вакуумной камере, при по-

мощи высокочастотного индуктора расплавляют твердую шихту (отходы специальной заготовки, чистые металлы и ферросплавы) и рафинируют жидкий металл; печи могут работать и на жидкой садке. Печи откачиваются диффузионными насосами, обеспечивающими достаточно низкие остаточные давления – меньше 10 Па. В последние годы ведутся интенсивные разработки по созданию промышленной вакуумной плазменно-индукционной печи. Применение плазмотрона ускоряет процесс расплавления шихты и позволяет более рационально организовать его, так как появляется возможность поддержания постоянной мощности печи, не зависящей от габаритов и плотности укладки шихтовых материалов.

Электронно-лучевые печи применяются для получения особо чистых металлов. В печах этого типа нагрев осуществляется благодаря бомбардировке поверхности нагреваемого предмета быстро движущимися электронами. Так как создать направленный поток электронов и сообщить ему достаточную энергию можно только в условиях высокого вакуума, в электронно-лучевых печах поддерживается давление порядка 10^{-3} – 10^{-4} Па. Основным элементом печи является нагревательный элемент или пушка, снабженная электромагнитным фокусирующим устройством и системой развертки луча, что позволяет получить пятно диаметром 5–10 мм на расстоянии 1,5–2 м от катода и перемещать его по поверхности слитка. Следует отметить, что электронно-лучевые печи используются не только для плавки, но и для различных процессов, связанных с нагревом материалов, например, при выращивании и зонной очистке монокристаллов, термической обработке ленточных и проволоочных материалов, испарение металлов с целью нанесения покрытий, для сварки, литья и т.д.

Вакуумные электропечи сопротивления являются наиболее универсальными, так как имеют много областей применения, например, их используют для нагрева длинномерных изделий, больших и тяжелых садов, деталей в подвешенном состоянии для предохранения их от деформации, для отжига трансформаторной стали и пр. Принцип устройства печей заключается в наличии герметичной, теплоизолированной камеры, внутри которой расположены нагревательные элементы, выделяющие тепло за счет протекания по ним электрического тока. Печи откачиваются диффузионными насосами, обеспечивающими остаточные давления менее 10^{-7} Па [8, 9]. По типу вакуумные электропечи сопротивления делятся на садочные и методические. В садочных электропечах садка остается неподвижной в течение всего времени нагрева и в них нельзя произвести очередную загрузку, предварительно не разгру-

зив печь. Эти печи отличаются относительно низкой производительностью. Наибольшее распространение получили такие садовые вакуумные электропечи, как камерные, шахтные, колпаковые, элеваторные. Высокопроизводительные методические вакуумные электропечи включают в себя загрузочную и разгрузочную шлюзовые камеры, камеры нагрева и охлаждения, систему устройств для перемещения садки в печи и откачную систему. По принципу перемещения садки применение нашли следующие разновидности методических печей: толкательные, печи с шагающим подом, многокамерные печи с перекатной тележкой и печи для термической обработки ленты и проволоки.

Назначение вакуумных электропечей сопротивления:

- для термообработки, отжига, закалки и пайки;
- для спекания и дегазации;
- для нагрева под обработку давлением;
- для специальных химико-технологических процессов.

Отжиг в вакууме (при давлении 10^{-1} – 10^{-3} Па) – термовакuumный процесс обработки металлов и сплавов, состоящий в их нагреве, выдержке и охлаждении для снятия наклепа, повышения пластичности, изменения структуры в нужном направлении, придания определенных электрических, магнитных и других свойств, а также для очистки от газовых и неметаллических включений. В вакууме подвергаются отжигу листы, проволока, заготовки для последующей обработки давлением, детали из различных металлов. Например, отжиг тантала и ниобия рекомендуется проводить в течение одного часа при 1300–1400°C и давлении не более 10^{-3} Па [10]. Ниобий обрабатывается методом вакуумной прокатки при 1100–1250°C, а после разрушения литой структуры легко обрабатывается давлением при комнатной температуре. После отжига при 1700–1730°C в вакууме твердость металла по Бриннелю возрастает до 800–900 Н/мм², предел прочности до 300–400 Н/мм², относительное удлинение 30%. Различают следующие виды отжига: высокотемпературный, обезгаживающий, обезуглероживающий, рекристаллизационный и пр.

Например, при производстве ртутных выпрямителей осуществляется в печах обезгаживающий отжиг деталей, изготавливаемых из низкоуглеродистых сталей. Он обеспечивает обезгаживание и получение светлой поверхности, что при разогреве деталей во время эксплуатации исключает образование или отслаивание окисной пленки и уменьшает газовыделение, благодаря чему предотвращается замыкание и пробой. Высокотемпературный отжиг в печах улучшает магнитные свойства и повышает процент выхода высших марок трансформаторной стали [10].

Закалка в вакууме – термовакuumный процесс обработки стали и некоторых сплавов (например, латуни, бронзы и др.) путем нагрева и затем быстрого охлаждения. Закалка вызывает резкое изменение свойств металла: у стали – получение чистой светлой поверхности без науглероживания или обезуглероживания, повышение упругости, прочности, твердости при пониженной вязкости, уменьшение деформации и коробления и пр.; у некоторых сталей и сплавов закалка приводит только к повышению вязкости. Например, широко применяется закалка рельсов из бессемеровской стали, обеспечивающая высокие пластические свойства и ударную вязкость даже при температурах вплоть до 50°C при малой чувствительности к старению.

Электropечи для вакуумной закалки подразделяют на печи для закалки в газе и для закалки в жидких средах. Закалка в газе после нагрева в вакууме проводится в шахтных и камерных печах. Эти печи широко применяются для закалки крупных изделий, медицинского и точного инструмента, деталей приборов и пр. В России впервые была создана шахтная вакуумная печь для закалки в циркулирующем инертном газе металлорежущего инструмента из легированных и быстрорежущих сталей, пресс-форм, фильер и деталей шариковых подшипников.

Предварительный нагрев изделий осуществляется при остаточном давлении в печи 0,1 Па [11]. Печи, предназначенные для проведения закалки в масле, снабжаются закалочным баком. Применяются различные схемы компоновки закалочных баков и нагревательных камер: закалочный бак не отделён от нагревательной камеры затвором и находится под ней, нагревательная камера расположена под закалочным баком и отделена от него вакуумным затвором и пр. Применение закалки в вакууме позволяет устранить последующую механическую обработку и повысить качество изделий.

2.3. Дистилляция в вакууме

Дистилляция металлов и сплавов в вакууме – один из технологических процессов вакуумной плавки, предназначенный для удаления из металла вредных примесей в газообразном состоянии с целью получения чистого металла для ракетной техники, атомной энергетики и других отраслей промышленности [1, 9]. Вакуумная дистилляция осуществляется преимущественно в вакуумных дуговых и индукционных печах при давлении ниже 10^{-1} Па.

Процесс вакуумной дистилляции заключается в испарении примесных элементов и последующей их конденсации. Сравнительно легко выделяются при нагревании металла в вакууме до 700°C водород

и гидриды. Удаление кислорода заметно ускоряется при нагревании до 1900–2000°C. В результате вакуумного рафинирования при 2300–2350°C из ниобия выделяются не только адсорбированные и растворенные газы, но и примеси: свинец, кремний, железо.

Вакуумная дистилляция серы создает благоприятные условия для десульфурации чугуна. Вакуумной дистилляции можно подвергать такие реакционно-способные металлы, как кальций, бериллий, цирконий, титан и др. Вакуумная дистилляция применяется для очистки губчатого титана и циркония после восстановления, в производстве чистых металлов: цинка, селена и редкоземельных металлов, при обогащении лома легких металлов.

2.4. Сварка и пайка в вакууме

Сварка в вакууме предназначена для получения неразъёмных соединений элементов приборов, деталей (узлов) конструкций машин, используемых в точном машиностроении, микроэлектронике, при создании атомных реакторов и пр. [12]. Различают два вида сварки в вакууме – электронно-лучевая сварка (сварка плавлением) и термодиффузионная сварка (сварка давлением).

Электронно-лучевая сварка осуществляется в вакууме при давлении остаточных газов 10^{-1} – 10^{-3} Па с помощью установки, включающей в себя вакуумную рабочую камеру, электронно-оптическую систему, формирующую электронный луч, различные приспособления для перемещения свариваемых деталей к электронно-оптической системе и откачную систему [10]. Установка включает в себя сварочный пост, энергокомплекс, вакуумную откачную систему, шкафы и пульт управления, комплект соединительных кабелей и трубопроводов. Установка позволяет выполнять линейную и круговую аксиальную сварку в вакууме при рабочем давлении в вакуумной камере $5 \cdot 10^{-1}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ Па [13].

Начиная с 60-х годов, электронно-лучевую сварку используют в производстве двигательных установок ракетно-космических комплексов. Её применение для получения неразъёмных соединений в сочетании с новыми высокопрочными материалами позволило создать двигатели нового поколения с высокими эксплуатационными характеристиками. Так, в НПО "Техномаш" освоена электронно-лучевая локальная сварка в вакууме узлов значительных габаритов, например, кольцевых секций топливных баков носителя "Энергия" из термически управляемого алюминиевого сплава. Новая перспективная область применения электронно-лучевой сварки – работы в условиях космического

пространства [14]. Электронно-лучевая сварка широко применяется в технологии микроэлектроники, а также при герметизации металлостеклянных корпусов электронных вакуумных приборов, для сварки тугоплавких, химически активных и разнородных материалов, изделий из стали.

Термодиффузионная сварка выполняется в вакууме при разрежении 10^{-3} – 10^{-2} Па с нагреванием места сварки до 0,4–0,8 от температуры плавления свариваемых материалов; при сварке разнородных материалов температурный нагрев определяется по температуре менее тугоплавкого материала. Таким способом можно сваривать большинство твердых материалов – как однородных, так и разнородных [15, 16]. При соединении трудносвариваемой пары материалов используется промежуточная прокладка.

Диффузионная сварка обеспечивает вакуумплотные, термостойкие и вибропрочные соединения при сохранении высокой точности, формы и геометрических размеров изделия; широко применяется при сварке термокомпенсаторов кристаллов, катодных ножек, замедляющих систем и других узлов и элементов электронных приборов.

Сварочные термодиффузионные установки обычно состоят из следующих основных узлов: вакуумная система для получения вакуума в камере, где происходит сварка; система для создания давления на свариваемые детали, а также для подъема и опускания камеры; электропривод; автоматика. Одно из основных направлений широкого внедрения термодиффузионной сварки – использование технологических процессов с применением термокомпрессионных устройств (ТКУ), позволяющих осуществлять сварку в вакуумных печах общепромышленного назначения.

Принцип действия ТКУ основан на использовании разности коэффициентов термического линейного расширения материалов свариваемых деталей и элементов оснастки для создания и передачи сжимающего усилия на свариваемые детали. В МАИ разработано ТКУ, которое помещают в камеру печи, подвергнутой вакуумированию [17]. При нагревании устройства возникает сдавливающее усилие, которое и передается на свариваемые детали. По окончании сварки детали совместно с устройством охлаждают, развакуумируют камеру, извлекают устройство с готовыми изделиями, затем производят разборку устройства и удаляют сваренные детали. Разработанное ТКУ применяется для диффузионного соединения в вакууме изделий из магнитных и немагнитных сталей, алюминия, меди, нержавеющей стали, бронзы и пр.

Основные преимущества диффузионной сварки: отпадает необходимость применять припои, электроды, флюсы, защитную газовую

среду; не происходит коробление деталей и изменение свойств металла в зоне соединения. Диффузионную сварку можно применять для получения конструкций самой разнообразной формы. Можно сваривать детали не только по плоскости, но и по конической (корпуса радиоламп), сферической (подпятники), криволинейной (облицовка труб), сложной рельефной поверхности (слой защитного покрытия мембран) и т.д.

Пайка в вакууме – процесс получения неразъёмного соединения путем нагрева места пайки и заполнения зазора между соединяемыми деталями (из металла и сплавов, стекла, керамики и др.) расплавленным припоем с его последующим отверждением. При пайке деталей из разнородных материалов для обеспечения прочного соединения подбирают материалы с близкими значениями коэффициента термического расширения или используют высокопластичные припои. Вакуумная пайка может быть совмещена с дегазационным отжигом. Различают два способа пайки в вакууме: пайка с локальным источником нагрева дуговым разрядом и высокотемпературная пайка.

В НПО "Техномаш" разработан технологический процесс высокотемпературной пайки слоистых конструкций в вакуумных печах для использования их в современных летательных аппаратах [18]. Применение, например, вакуумной пайки для изготовления многослойных теплообменников из алюминиевых сплавов обеспечивает получение паяных соединений, не уступающих по прочности и коррозионной стойкости основному материалу, что позволяет значительно увеличить ресурс работы и эксплуатационную надежность узлов. Процесс осуществляется в вакуумной печи периодического действия, в которой можно выполнять одновременную пайку (3-5)слойных теплообменников. Мощность печи 200 кВт, давление 10^{-2} – 10^{-3} Па, максимальная рабочая температура 750°С.

Процесс дуговой пайки сочетает преимущества способов сварки плавлением и высокотемпературной пайки с общим нагревом в вакууме и контролируемой атмосферой [17]. Полученные таким образом неразъёмные соединения обладают повышенной жаропрочностью и термостойкостью и могут применяться при изготовлении и ремонте деталей газотурбинных двигателей из литейных высокопрочных сплавов [19].

2.5. Спекание в вакууме

Спекание металлических и керамических порошковых материалов является одной из важнейших технологических операций, применяемых в порошковой металлургии. Методом спекания изготавлива-

ются конструкционные детали машин и механизмов; фильтры для очистки жидкостей и газов, уплотнительные материалы для газовых турбин, вакуумного и другого оборудования, контакты, магниты, ферриты для изделий электро- и радиотехнической промышленности и пр. Процессу спекания способствуют: использование мелкодисперсных и неокисленных порошков, высокая температура порошков перед прессованием и максимально возможное уплотнение прессовок давлением [20].

В вакууме преимущественно выполняется спекание твердых сплавов, твердых материалов, постоянных магнитов, тугоплавких металлов и танталовых конденсаторов.

В электронике широко используются пористые компактные структуры, образованные спеканием в вакууме порошка гидрида ниобия, в качестве металлических обкладок ниобиевых оксидно-полупроводниковых конденсаторов (ОПК). Например, спекание в вакууме мелкодисперсного порошка гидрида ниобия вместо ниобиевого порошка позволяет повысить удельное значение емкости ниобиевых ОПК [21].

Представляет интерес высокотемпературное спекание плазмохимических порошков на основе ZrO_2 , так как такая керамика обладает высокой вязкостью разрушения, и может найти применение в качестве конструкционной [22]. Спекание проводили в вакуумной печи ПО "Эмитрон" с хромит-лантановыми нагревателями. Достижение высокой температуры спекания $1800^\circ C$ позволило получить высокоплотный материал с хорошими механическими свойствами.

В НПФ Термовак АО "ВНИИЭТО" успешно осуществляется вакуумное спекание изделий из магнитных и твердых сплавов, быстрорежущих и инструментальных сталей, изделий на основе нитридов и карбидов и прочее в вакуумных печах с углеродными нагревателями при давлении 10^{-2} – 10^{-3} Па [23].

Наряду с такими вакуумными процессами, как спекание, выплавка и прочее, широкое применение в металлургии находит процесс вытягивания кристаллов из расплава. Этот процесс осуществляется в вакуумных электропечах для получения металлов высокой чистоты, например, меди, никеля, тантала, золота; кристаллов $NaCl$, CaF_2 ; полупроводниковых материалов, а именно, кремния, германия, арсенида галлия; тугоплавких окислов, например, сапфира, гранатов.

Библиографический список

1. Вакуумная металлургия. М.: Металлургиздат, 1962.
2. Внепечное вакуумирование стали. М.: Металлургия, 1975.

3. **Хребин В. Н.** Эффективность циркуляционного вакуумирования стали // Сталь. 1994. № 10. С.25–27.
4. **Производство** стального листа для автомобилестроения// Металлург. 1994. № 4. С. 28.
5. **Самарин А.М.** Применение вакуума в сталеплавильных процессах. М.: Металлургиздат, 1957.
6. **Ргос.** Intern. Conf. on the Sci. & Techn. of Iron and Steel Tokyo, Japan, September, 7-11. 1970. Part. I. Tokyo. 1971.
7. **Экономика** вакуумной металлургии. М.: Металлургия, 1989.
8. **Лейканд М.** Вакуумные электрические печи. М.: Машиностроение, 1977.
9. **Мармер Э.Н.** Электроды для термовакuumных процессов. М.: Энергия, 1977.
10. **Шумский К.П.** Вакуумные аппараты и приборы химического машиностроения. М.: Машиностроение, 1974.
11. **Фомин В.М.** Вакуумная электропечь сопротивления СШВ-3.3/13ГМ1 // Электротермия. 1972. В. 7(121)–8(122), С. 3.
12. **Электронно-лучевая** сварка материалов в вакууме // Обзоры по электронной технике, ЦНИИ Электроника, 1977.
13. **Мошкин В.Ф.** Оборудование для сварки и родственных технологий в машиностроении // Автоматическая сварка. 1994. № 11. С. 40-43.
14. **Казаков В.А.** Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки в производстве аэрокосмической техники // Сварочное производство. 1994. № 11(720). С. 2–5.
15. **Казаков Н.Ф.** Диффузионная сварка в вакууме. Сер. 4, № 16 –М.: Знание, 1966.
16. Диффузионная сварка материалов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1978.
17. **Беляков В.И.** Диффузионная сварка изделий с принудительным деформированием в вакуумных печах // Изв. вузов. Машиностроение. 1993. № 3–5. С. 92–96.
18. **Суслов А.А.** Пайка слоистых конструкций на основе алюминия и титана // Сварочное производство. 1994. № 12(721). С. 11–13.
19. **Гладков Э.А.** Разработка новых процессов и методов их управления и автоматизации применительно к существующим и новым конструкционным материалам // Машиностроение. 1993. № 6. С. 12–14.
20. **Грохольский Б.П.** Порошковая металлургия и применение композиционных материалов. Л.: Лениздат, 1982.
21. **Скатков Л.И.** Исследование пористости компактных структур, образованных вакуумным спеканием порошка гидроксида ниобия. //Физика и химия обработки материалов. 1994. № 6. С. 157–159.

22. **Савченко Н.Л.** Высокотемпературное спекание в вакууме плазмо-химических порошков на основе тетрагонального диоксида циркония // Порошковая металлургия. 1994. № 1–2. С. 26–30.
23. **Фармер Э.Н.** Вакуумные печи с углеродными нагревателями для термической обработки и спекания // Металловедение и термическая обработка металлов. 1994. № 4. С. 22–25.

3. ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ХИМИИ, НЕФТЕХИМИИ И ХИМИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

В химической промышленности применение вакуумных технологий позволяет осуществлять дегазацию изоляционных масел и синтетических материалов; дистилляцию фармацевтических продуктов и консервирующих веществ для пищевых продуктов; адсорбционную очистку нефтепродуктов; сублимационную сушку пищевых продуктов, медицинских препаратов и прочих.

3.1. Вакуумная и молекулярная дистилляция (перегонка)

Вакуумная дистилляция – технологический процесс разделения жидких смесей на отличающиеся по составу отдельные фракции путем их частичного испарения в вакууме с последующей конденсацией образовавшихся паров. Дистилляция производится путем частичного испарения кипящей жидкой смеси, непрерывного отвода и конденсации образовавшихся паров. Полученный конденсат называется дистиллятом, а неиспарившаяся жидкость – кубовым остатком.

Немецкая фирма Ofu Recycling разработала вакуумную дистилляционную установку, содержащую растворители смеси, для непрерывной очистки небольших количеств загрязненных растворителей [1]. Установка функционирует при пропускной способности около 10 л/ч. Установка включает в себя вакуумный резервуар с непосредственным электрическим обогревом, обеспечивающим возможность регулирования температуры до 200°C. Давление может варьироваться в диапазоне $5 \cdot 10^3$ – 10^4 Па.

Еще одна из германских фирм предлагает вакуумную дистилляционную установку для очистки загрязненных жидкостей в щадящих условиях [2]. Установка работает при давлении $8 \cdot 10^4$ Па. Температуры варьируется в диапазоне 80–90°C. Загрязненная жидкость всасывается непосредственно из куба перегонной колонны и подвергается дистил-

ляции. Частицы примесей и высококипящие компоненты остаются в нижней части установки и, достигнув заданной концентрации, периодически удаляются через вентиль.

Дистилляция в вакууме широко применяется в химической промышленности для изготовления восков, сложных эфиров, в медицине для изготовления фармацевтических препаратов, в парфюмерии для изготовления ароматических веществ.

Молекулярная дистилляция, являющаяся разновидностью вакуумной дистилляции, - процесс разделения жидких смесей путем свободного испарения в вакууме (10^{-1} – 10^{-2} Па) при температуре ниже точки их кипения; осуществляется при минимально коротком расстоянии между испаряемой поверхностью и конденсатором. В современных молекулярных кубах процесс испарения протекает в очень тонкой пленке (слое) жидкости (0,01–0,05 мм), уменьшающей время нахождения вещества на поверхности и соответственно опасность его термического разложения. Конденсация молекул на поверхности конденсатора при большой разности температур (50–100°C) происходит почти мгновенно.

Молекулярная дистилляция применяется:

- для регенерации нефтепродуктов и отработанных минеральных масел из двигателей, редукторов, трансформаторов, турбин;
- для производства рабочих жидкостей вакуумных насосов;
- для очистки термически нестойких органических веществ, например, эфиров фталевой, себациновой и других кислот;
- для выделения витаминов из рыбьего жира и пр.

Одна из американских фирм разработала новый процесс перегонки в тонком слое под высоким вакуумом – молекулярную перегонку вакуумного остатка, позволяющую извлечь дополнительно 50–60% тяжелой дистиллятной фракции из остатка, полученного на установке вакуумной дистилляции [3]. Остаток после удаления серы может быть направлен на дальнейшую переработку.

Новый процесс даёт возможность сконцентрировать в небольшом количестве остатка металлы и избыток нефти на ранней стадии переработки. Полученный дистиллят можно использовать для производства смазочных масел или парафина высокой степени чистоты и в качестве сырья для каталитического крекинга флюид.

Установка включает в себя газосепаратор и два перегонных куба, в которых процесс разделения происходит в тонком слое при остаточном давлении от 50 до 5 Па. Кубы обогреваются циркулирующим высокотемпературным теплоносителем. Тяжелый вакуумный дистиллят конденсируется во внутреннем конденсаторе. Капли конденсатора отво-

дятся, что способствует снижению содержания металла и асфальтенов в тяжелом дистилляте до минимума.

3.2. Вакуумная ректификация

Ректификация – разделение жидких и сжиженных газовых смесей, основанное на диффузионном обмене вещества между неравновесными фазами и сопровождаемое межфазным теплообменом [4]. Ректификация осуществляется в ректификационных колоннах, состоящих из куба-испарителя, колонны с внутренними распределительными устройствами и конденсатора. Образовавшиеся в кубе-испарителе пары проходят через колонну снизу вверх, контактируя со стекающей жидкостью. Из колонны пар поступает в конденсатор, откуда часть образовавшегося конденсата, называемого флегмой, возвращается в верхнюю часть колонны, а остаток представляет собой конечный продукт-дистиллят. Флегма стекает вниз, контактируя с паром, и попадает в куб-испаритель, где вновь испаряется. Внутреннее распределительное устройство, предназначенное для контакта жидкости и пара, представляет собой тарелки различных конструкций или насадки. Методом вакуумной ректификации пользуются также в случае разделения термолабильных жидкостей.

Вакуумная ректификация применяется в нефтяной промышленности для разделения нефти на бензин, мазут и другие продукты, в производстве сероуглерода, синтетического каучука, для разделения изотопов и пр. [4, 5]. Фирмы Hays Chemical Distribution Ltd, и Speichim сообщают о совместно разработанной промышленной вакуумной ректификационной установке, предназначенной для очистки растворителей, реактивов и сырья, рекуперацию отработанных продуктов с получением дистиллятов высокой чистоты для фармацевтической и электро-технической промышленности и производств особо чистых реакторов [2]. В установку входят 5 колонн из нержавеющей стали, имеющих по 65 тарелок и работающих при температурах 0–200°C и давлении от высокого вакуума до 6 атм., а также испарители, перегонные кубы, конденсаторы и пр.

3.3. Тепловая вакуумная и сублимационная сушка

Сушка – термический процесс удаления (испарения) влаги из твердых материалов. Различают тепловую вакуумную сушку и сублимационную вакуумную сушку материала в замороженном состоянии.

Вакуумную сушку используют для чистых химических продук-

тов, взрывоопасных и термочувствительных материалов и т.д. Например, ОАО "НИИХИММАШ" предлагает роторную вакуумную сушилку модели РВИ, 2-4, ОВК-3 периодического действия для сушки жидких, пастообразных и сыпучих продуктов, в том числе токсичных или взрывоопасных [6].

Сушилка представляет собой горизонтальный цилиндрический корпус с паровым обогревом, снабженный ротором специальной конструкции (мешалкой). Такой ротор позволяет высушивать жидкие, пастообразные и сыпучие материалы с получением порошкообразного или агломерированного сухого продукта. Установка не имеет газовых выбросов в атмосферу, а выпаренная влага конденсируется и пригодна для возврата в производственный цикл. Давление греющего пара 0,5 МПа, остаточное давление в сушилке 13,3 кПа. Эта сушилка может использоваться для сушки гальванических шламов и осадков сточных вод.

Вакуумная сушилка с псевдоожиженным слоем итальянской фирмы S.p.A. предназначена для отгонки органических растворителей и сушки гранул, а также покрытия последних пленками. Корпус сушки вмещает 0,005–1,56 м³ исходного продукта, который продувается нагретым до 80°C воздухом, циркулирующим по замкнутому контуру с расходом 200–15 000 м³/ч [7]. В корпусе поддерживается остаточное давление 1,5–40 кПа.

В сублимационных сушильных установках влага удаляется из продукта в замороженном состоянии под высоким вакуумом (остаточное давление 5–1·10²Па), а необходимое тепло подводится к материалу либо путем контакта с нагретыми поверхностями, либо радиацией от нагретых экранов [8, 9].

Сушильная установка включает в себя цилиндрический сублиматор, снабженный обогреваемыми горячей водой пустотелыми плитами, на которые устанавливаются противни с высушиваемым материалом. Пары влаги направляются в трубчатый конденсатор-вымораживатель, соединенный с вакуум-насосом.

Достоинством сублимационной сушки является сохранение основных биологических качеств материала и незначительный удельный расход тепла. Сублимационная сушка применяется для сушки пищевых продуктов таких, как фрукты, яичные и молочные продукты, кофе, чай и другие, а также термолабильных химических продуктов, как, например, красящих веществ, тканевых и растительных экстрактов, белковых препаратов. Методом сублимационной сушки получают большинство лекарственных препаратов фармацевтической промышленности.

3.4. Фильтрация в вакууме

Фильтрацию в вакууме применяют для разделения различных суспензий и в некоторых случаях для разделения коллоидных растворов. Фильтрация производится пропусканием суспензии через материал – керамические плитки, песок, металлические сетки, чаще всего ткань. Жидкость (фильтрат) проходит через фильтр, твердые частицы остаются в виде осадка.

На вакуумных фильтрах, в первую очередь, фильтруют легко фильтрующиеся и особенно кристаллические вещества [10]. Разрежение в вакуумном фильтре создается откачкой воздуха из-под пористого фильтрующего слоя. Суспензия перед фильтром находится под атмосферным давлением. Благодаря разности между атмосферным давлением с одной стороны, фильтрующей перегородки и вакуумом с другой стороны, жидкость проталкивается сквозь слой фильтрующего материала. Давление воздуха за фильтром поддерживается $6 \cdot 10^2$ – $2,6 \cdot 10^4$ Па.

Различают вакуумные фильтры периодического и непрерывного действия. К вакуумным фильтрам периодического действия относятся фильтры с неподвижной жесткой перегородкой, листовой или мешочный фильтры, и самые простые по устройству нутч-фильтры с тканевой перегородкой, работающие при давлении $5 \cdot 10^4$ – $7 \cdot 10^4$ Па. Вакуумные фильтры непрерывного действия предназначены обычно для определенного продукта. Свойства подводимой суспензии должны оставаться неизменными. К вакуумным фильтрам непрерывного действия относятся барабанные фильтры различных модификаций, дисковые, тарельчатые, ленточные.

Широкое распространение получили барабанные вакуумные фильтры в производствах по обогащению руд черных и цветных металлов при остаточном давлении $6,5 \cdot 10^2$ Па и барабанные вакуумные фильтры без центрального золотника для целлюлозно-бумажной промышленности. Следует отметить, что наибольшее применение находят вакуумные фильтры для фильтрации пульп с относительно крупными твердыми частицами.

3.5. Выпаривание в вакууме

Выпаривание в вакууме применяется в химическом производстве для сгущения растворов или для полного удаления растворителей [10]. При выпаривании чаще всего происходит кипение раствора, на-

ходящегося в аппарате, и удаление образующегося пара. Выпаривание применяется главным образом в тех случаях, когда образующиеся пары являются малоценными по сравнению с остающейся массой. Кроме того, иногда выпаривание служит для выделения в чистом виде растворителя, например, при получении пресной воды.

Процесс выпаривания в вакууме осуществляется при пониженной температуре. При этом для обогрева аппарата используется отработанный пар или пар низкого давления. Выпаривание в вакууме проводят в одно- или многокорпусных вакуумных установках. Если количество выпариваемой воды велико, то обычно применяют многокорпусное выпаривание, при котором тепло на выпаривание используется многократно путем применения для обогрева вторичного пара. Если выпаривается не водный раствор, то в качестве вторичного пара можно использовать растворитель, в котором растворено концентрирующее вещество.

Конструкция однокорпусной вакуумной установки включает в себя теплообменник, расположенный между поступающим и выходящим раствором, и вакуумный выпарной аппарат, представляющий собой герметически закрытый сосуд, последовательно соединенный с конденсатором, где улавливаются пары растворителя, а также с вакуумным насосом для откачки воздуха из системы.

Многократное выпаривание в многокорпусной вакуумной установке заключается в том, что греющий пар подается только в нагревательную камеру первого выпариваемого аппарата. Этот пар называется первичным. Образующийся при кипении раствора в первом аппарате так называемый вторичный пар подается в нагревательную камеру второго аппарата. Пар, образующийся во втором аппарате, подается в нагревательную камеру третьего аппарата и т.д. Давление вторичного пара меньше, чем первичного, и температура кипения в каждой последующей камере ниже, чем в предыдущей. Последний выпарной аппарат соединяется последовательно с конденсатором и вакуумным насосом. Таким образом, осуществление описанной схемы возможно только при наличии перепада давления между аппаратами. Необходимая разность давления может быть достигнута созданием избыточного давления в первом аппарате, и разрежения в последнем аппарате или комбинацией этих условий.

3.6. Кристаллизация в вакууме

Кристаллизация в вакууме – вакуумный химико-технологический процесс выделения твердой фазы из жидкого расплава данного вещества или из раствора. Это один из основных способов получения твердых веществ в чистом виде [10].

Кристаллизация осуществляется в вакуумных кристаллизационных установках, в которых, благодаря созданию вакуума и испарению растворителя, раствор охлаждается и выделяются кристаллы. Если теплый насыщенный раствор вводить в пространство, в котором поддерживается вакуум, соответствующий температуре кипения раствора, более низкой, чем исходная температура, то введенный раствор разбрызгивается и охлаждается в результате адиабатического испарения. При этом происходит не только кристаллизация, но и испарение. При изменении давления можно регулировать величину и характер кристаллов изменением температуры и скорости их образования из выпариваемого раствора.

Наиболее экономичными являются многокорпусные вакуумные кристаллизационные установки. В этих установках часть жидкости в первых ступенях испаряется при низком вакууме, а более высокий вакуум достигается в последней ступени. Установки работают непрерывно и отличаются высокой производительностью.

Вакуумная кристаллизация применяется в массовом производстве таких продуктов, как сульфат аммония, хлорид калия и т.п., заменяя в некоторых случаях выпаривание и дистилляцию. При этом улучшаются качество получаемого продукта и экономические показатели. Вакуумная кристаллизация применяется также для получения высокомолекулярных ароматических оксидных соединений из смеси с низкомолекулярными соединениями, в промышленности пластических масс для получения фенола и его производных и для получения лактама как основного материала в производстве нейлона. Вакуумная кристаллизация вместо выпаривания используется в производстве концентрированных фруктовых соков, которые можно в дальнейшем подвергнуть сублимационной сушке.

Библиографический список

1. **Vakuum** Destillationanlage reinigt Losemittelgemische // Maschinenmarkt. 1994. Vol. 100. № 16. S. 91.
2. **Yakuum** Destillieranlage reinigt Flüssigkeiten Schloriend // Maschinenmarkt. 1993. Vol. 99. № 49. S. 72.

3. **Роберте Д.А.** Дополнительное извлечение дистиллятных фракций из остатка вакуумной перегонки // Нефтегазовые технологии. 1994. № 4–5. С. 44–47.
4. **Стабников В.Н.** Ректификационные аппараты. М.:Машиностроение, 1965.
5. **Hirschberg H.** Moderne Elemente //Chem. Ind. 1992. № 115. P. 22–23.
6. **Осинский В.П.** Сушильная техника широкого назначения. // Химическое и нефтяное машиностроение. 1994. № 9, С.10.
7. **Daniele P.** Essiccatore a letto fluido sotto vuoto // Technol, Ghim. 1991. Vol. 11. № 5. P. 74–77.
8. **Кришер О.** Научные основы техники сушки. М.: Машиностроение, 1961.
9. **Шумский К.П.** Основы расчета вакуумной сублимационной аппаратуры. М.: Машиностроение, 1967.
10. **Мармер Э.Н.** Электроды для термовакuumных процессов. М.: Энергия, 1977.

4. ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

«Электротехника это отрасль науки и техники, связанная с применением электрических и магнитных явлений для преобразования энергии, получения и изменения химического состава веществ, производства и обработки материалов, передачи информации, охватывающая вопросы получения, передачи, преобразования и использования электрической энергии» [1]. «Электротехническая промышленность – отрасль промышленности, производящая продукцию для производства, передачи и потребления электрической энергии. Электротехническая промышленность выпускает силовое электротехническое оборудование» [2].

Исходя из этих определений, можно заключить, что понятие электротехника шире, чем понятие электротехническая промышленность. Области науки и техники, которые относятся к электротехнике непосредственно, связаны, кроме электротехнической промышленности, с химической и металлургической промышленностью, электроникой и радиоэлектроникой, электротехническими установками, использующими электромагнитные явления, относящимися к установкам для электронной промышленности и к научному оборудованию. С другой стороны, получение, передача и использование электрической энергии непосредственно связано с энергетикой.

Вакуумная техника используется преимущественно в таких раз-

делах электротехники как электрические аппараты высокого напряжения, электротехническое оборудование специального назначения (термоядерные установки, ускорители), электротехнология: электрооборудование транспорта, светотехника и инфракрасная техника. В электротехнологию включают вакуумную металлургию, вакуумное напыление, вакуумные электропечи, электросварочное оборудование, вакуумную пайку. В аппаратах высокого напряжения используются вакуумные выключатели, вакуумные дугогасительные камеры, вакуумные коммутационные устройства. В электротехнической промышленности вакуумная техника находит применение в сушильных и пропиточных установках для производства трансформаторов, конденсаторов, кабелей.

4.1 Коммутационная техника

Большую роль в коммутационной технике играет вакуумное коммутационное оборудование [3].

Динамика развития коммутационной техники в последние годы в первую очередь определяется активным освоением производства вакуумных и электрогазовых выключателей, а также дугогасительных устройств, где дугогасительной средой также является, как правило, вакуум или элегаз. Это определяется несколькими причинами. Во-первых, потенциальными возможностями развития и совершенствования этого типа оборудования. Совершенствование контактной дугогасительной системы в вакуумных выключателях путем применения продольного магнитного поля позволяет преодолеть предел отключающей способности в 31,5–40 кА, наметившийся для дугогасительных систем с поперечным магнитным полем, и довести его до 100 кА и выше, практически сняв вопрос о пределе коммутационной способности по току. Во-вторых, герметичная конструкция устройства вакуумного выключателя существенно уменьшает требования к обслуживанию. Этому способствует также и то, что вакуум практически не ухудшает своих дугогасительных и электроизоляционных свойств в процессе эксплуатации после многократных отключений тока.

Вследствие малого падения напряжения на дуге, и следовательно, малого выделения энергии, а также вследствие химической инертности этих дугогасительных средств, контактная система подвергается малой эрозии, что способствует увеличению ресурса таких аппаратов. Дугогасительные устройства содержат относительно небольшое число деталей, в том числе подвижных, что способствует созданию аппаратов с повышенной степенью надежности.

Дугогасительные устройства вакуумных выключателей име-

ют простую конструкцию – это два контакта, расходящиеся при отключении тока на небольшое (10 мм) расстояние.

В работе [4] описаны основные физические принципы при коммутации тока вакуумными выключателями, выделены проблемы, связанные с неустойчивостью дуги при отключении малых токов, многократными пробоями при малых расстояниях между контактами и основными конструктивными принципами дугогасительных устройств. Проведен анализ характеристик вакуумных выключателей в различных режимах коммутации.

Преимуществом вакуумных выключателей являются более высокие коммутационный и механический ресурсы [3]. При отключении токов короткого замыкания они превосходят элегазовые выключатели в несколько раз из-за существенно меньшей эрозии контактов, особенно при работе в продольном магнитном поле. Отсутствие трущихся частей и малый ход контактов позволяют делать дугогасительные камеры с большим в несколько раз механическим ресурсом, который в основном ограничивается усталостными характеристиками сильфонов. При малых ходах, порядка нескольких миллиметров, механический ресурс может быть повышен до сотен тысяч и миллионов операций.

На мировом рынке основные типы выключателей на напряжение выше 6 кВ являются вакуумными или элегазовыми. В Японии, например, вакуумные выключатели составляют более половины выпуска всех выключателей.

Фирма Toshiba разработала дугогасительную камеру с рекордными коммутационными характеристиками [5]. Выпускаются камеры с током отключения 100 кА при напряжении 13,8 и номинальном токе 3000 А. Сообщается об опытном образце дугогасительной камеры на 145 кВ при токе отключения 30 и 200 кА при напряжении 13,8 кВ. Наиболее распространенными в Японии являются выключатели на 6,6 кВ. На их долю приходится 66% всех выключателей. Для сравнения доля выключателей 11–44 кВ составляет 12%, 77 кВ – 18%, 145 кВ – 3% и 275 кВ – 1%. Вот почему особое внимание уделено созданию экономичного, конкурентоспособного и не требующего обслуживания в течение всего срока службы вакуумного выключателя на напряжение 6 кВ. Он имеет несколько типоразмеров с номинальным током на 600, 1200 и 2000 А. Время отключения 0,035 с.

4.2. Вакуумная технология и оборудование в процессах создания высоковольтной изоляции

В высоковольтном оборудовании энергосистем и в электрофизических установках различного назначения используются многие виды внутренней изоляции. Одним из видов изоляции является бумажно-пропиточная изоляция (БПИ), при изготовлении которой используется вакуумная техника [6, 7]. Исходным материалом для БПИ служат специальные электроизоляционные бумаги и минеральные (нефтяные) масла или синтетические жидкие диэлектрики. Основу БПИ составляют слои бумаги. Каждый слой бумаги может быть сплошным или состоять из витков бумажной ленты. В первом случае это рулоны шириной до 3,5 м, во втором - ролики бумажной ленты шириной от 20 до 400 мм. Рулонная БПИ применяется в секциях силовых конденсаторов и в вводах (проходных изоляторах); ленточная - в конструкциях с электродами относительно сложной конфигурации или в конструкциях большой длины, например в кабелях.

Технология изготовления БПИ состоит в намотке необходимого числа слоев бумаги, вакуумной сушке и пропитке в вакуумных условиях дегазированным маслом или другим жидким диэлектриком. Так как БПИ является многослойной, в ней дефекты твердого диэлектрика (бумаги) заведомо ограничены пределом одного слоя, который многократно перекрывается другими слоями. В БПИ образуется система сообщающихся узких зазоров между слоями и большое количество микропор между волокнами самой бумаги. Благодаря этому при вакуумной сушке обеспечивается удаление воздуха и влаги, а при пропитке – надежное заполнение зазоров и пор маслом или другой пропиточной жидкостью. Наилучшими электрическими и механическими свойствами обладают специальные конденсаторные и кабельные бумаги. Недостатком БПИ являются невысокие допустимые рабочие температуры и горючесть.

Цель вакуумной сушки и пропитки заключается в увеличении электрической прочности. Жидкий диэлектрик, заполняющий поры бумаги, имеет значительно более высокую электропрочность, чем воздух. Для конденсаторной бумаги указывается температура сушки от 120 до 130°C при остаточном давлении 0,1–0,01 Па, а пропитки высушенным и дегазированным жидким диэлектриком – от 80 до 90°C при остаточном давлении 0,1–1 Па [6].

Большое внимание уделяется сушке и пропитке бумажной изоляции силовых кабелей [8]. Пропиточная бумага должна обладать высокой электропрочностью, малыми диэлектрическими потерями,

высоким сопротивлением, высокой механической прочностью. Большинство свойств бумаги существенно зависит от газосодержания. При обычной влажности воздуха (70%) бумага по массе содержит 7–9,5% воды. Для получения высоких электроизоляционных свойств необходимо снизить влагосодержание до 0,3% и менее, а затем пропитать сухим дегазированным пропиточным составом на основе минеральных масел.

При нагреве бумажной изоляции в атмосферных условиях до температуры 100–120°C влагосодержание может быть снижено до 1,5–2%. Снижение давления пара над поверхностью бумаги до 10 Па позволяет при температуре 120°C уменьшить влагосодержание до 0,1%.

Для дегазации масла используются специальные дегазационные котлы, в которых при температуре 125°C создается остаточное давление $2,6 \cdot 10^3$ Па (кабели на напряжение до 10 кВ) и $1,3 \cdot 10^3$ Па (кабели на напряжение 20 и 35 кВ). При дегазации масла, предназначенного для кабеля на 110 кВ и выше, применяется способ капельного распыления в дегазационных котлах или поверхностного растекания, когда масло протекает через вещество с сильно развитой поверхностью. В этом случае остаточное давление поддерживается на уровне 1–10 Па. Процесс дегазации при этом длится от нескольких десятков до нескольких сотен часов.

Приведем пример, дающий представление о сушильно-пропиточном отделении цеха [8–10]. Кабель поступает в сушильно-пропиточное отделение уложенным в металлическую корзину. В вакуумный сушильно-пропиточный котел загружается по две корзины с кабелем. Каждый котел включается в систему цеховых массопроводов для подачи в него пропиточного состава. В систему вакуумирования входят вакуумные насосы и конденсационные колонки. В комплекс технологического оборудования включаются также циркуляционные насосы и теплообменники для пропитки.

Технология изготовления высоковольтных маслонаполненных вводов с бумажно-масляной изоляцией также базируется на широком применении вакуумной техники. Ввод служит для изолирования от заземленного силового оборудования высоковольтного токоведущего вывода. Ввод состоит из изолированной бумагой или элегазом токоведущей трубы, соединительной втулки и двух фарфоровых крышек. Габариты вводов составляют по длине от 2,5 м для вводов 110 кВ до 15 м для вводов 1150 кВ [11].

В технологии изготовления вводов заводом «Изолятор» применяют водокольцевые насосы ВВН-1,5, форвакуумные НВЗ-150, двух-

роторные и бустерные насосы. Кроме того, для сушки и дегазации трансформаторного масла, заливаемого во вводы, используют как отечественные дегазационные установки ВДУ-3 и ВДУ-10, так и импортные.

Для обеспечения высокой электрической прочности бумажную изоляцию подвергают термовакуумной обработке т.е. сушат при температуре 105°C под вакуумом 10^2Па в индукционных шахтных вакуумных печах.

Предварительно, после прогрева бумажной изоляции до 105°C , на сутки включают водокольцевые насосы для удаления основной массы водяного пара из печей, выделяющегося из бумажной изоляции, затем включают форвакуумный насос, а за ним – бустерный.

В результате применения такой технологии термовакуумной обработки было достигнуто остаточное давление в печах 10^{-1}Па и весьма низкое влагосодержание внутри бумажной изоляции – менее 0,1%.

Высушенная бумажная изоляция поступает на сборку вводов. Собранные вводы вакуумируют через отверстие диаметром 6 мм в течение 24–48 ч, до остаточного давления 133–400 Па после чего производится заливка вводов трансформаторным маслом под вакуумом. Такая технология обеспечивает низкое газосодержание масла в выпускаемых вводах, не более 1%. Значительную долю в увеличении газосодержания масла составляет газ, оставшийся в бумажной изоляции после вакуумирования перед заливкой масла.

За последние 20 лет в мировой практике высоковольтного аппаратостроения изменились взгляды на необходимость глубокого вакуумирования бумажной изоляции в процессе сушки и пропитки маслом. Если раньше считали, что сушку бумажной изоляции необходимо производить при остаточном давлении 10^{-1}Па , то в настоящее время считают, что оптимальное давление $10\text{--}10^3\text{Па}$. В то же время нашло обоснование повышение глубины вакуума непосредственно перед пропиткой бумажной изоляции в пределах 10^{-1}Па . Автор отметил, что у завода «Изолятор» в то время для реализации указанного требования не было отечественного вакуум-пропиточного оборудования [11]. Необходимы были вакуумные маслостойкие вентили, клапаны, затворы, конденсаторы паров воды, вакуумные агрегаты с воздушным охлаждением, состоящие из двухроторного и форвакуумного насосов, течеискателей. Установленные на заводе «Изолятор» бустерные и водокольцевые насосы не использовались из-за отсутствия надежных схем блокировки вакуумной системы от аварийного заполнения маслом и водой при внезапном отключении электроэнергии.

Для силовых трансформаторов на напряжения от 10 до 1150 кВ в качестве основной используется маслобарьерная изоляция (МБИ), при изготовлении которой также используется вакуумная технология [12].

Основу МБИ составляет минеральное трансформаторное масло, которое надежно заполняет изолирующие промежутки между электродами любой сложной формы и обеспечивает хорошее охлаждение конструкции за счет конвективного или принудительного движения масла. Достоинством этого типа изоляции является простота, конструкции и технологии, интенсивное охлаждение активных частей оборудования. Недостатком МБИ является меньшая, чем у БПИ электропрочность, пожаро- и взрывоопасность.

Технология изготовления МБИ включает сборку конструкции, сушку ее под вакуумом и заполнение дегазированным маслом.

Изоляция силовых трансформаторов представляет сложную систему, состоящую из внешней и внутренней частей, обмоток, выводов и вспомогательных устройств. В процессе производства изоляция трансформатора подвергается вакуумной сушке при температуре 110–120°C и остаточном давлении 100–10 Па, для чего активная часть трансформатора помещается в сушильный шкаф. После окончания сушки при сохранении вакуума температуру в сушильном шкафу снижают до 80–85°C и в шкаф заливают высушенное дегазированное трансформаторное масло, обладающее электропрочностью не менее 200 кВ/см. По окончании заливки активную часть выдерживают в шкафу, заполненном маслом при наличии вакуума над поверхностью масла в течение 3–5 часов, затем масло сливают, выдерживают под вакуумом в течение двух часов.

Благодаря вакуумной сушке перед пропиткой обмоток электродвигателей и трансформаторов увеличивается их теплопроводность. Обмотки нагреваются протекающим по ним электрическим током по всей толщине, а охлаждение идет только с поверхности. Чем меньше в обмотке воздуха и больше смолы или масла, тем больше ее теплопроводность и меньше разогрев.

Вакуумная технология находит применение не только в производстве конденсаторов и кабелей с БПИ. Одним из типов электрических конденсаторов является вакуумный конденсатор, имеющий меньшие диэлектрические потери, чем газовый, малый температурный коэффициент емкости, большую устойчивость к вибрациям по сравнению с газонаполненным [13]. Значение пробивного напряжения вакуумного конденсатора не зависит от атмосферного давления, поэтому он широко используется в авиационной технике.

Вакуумная техника применяется также при испытании герметичности конденсаторов, заполненных элегазом. Испытуемый конденсатор помещается в герметичную камеру, на первом этапе откачивается с помощью мощных вакуумных насосов для удаления адсорбированных газов. На втором этапе камера за короткое время наполняется сухим воздухом до давления ниже атмосферного и отбирается проба из смеси воздуха и (в случае негерметичности) элегаза. Встроенные в систему датчики давления работают на центральный измерительный комплекс.

Большую роль играет вакуумная технология и вакуумно-технологическое оборудование в производстве металлопленочных конденсаторов. Одним из методов изготовления тонкопленочных конденсаторов является радиочастотное магнетронное распыление мишеней из керамики BaTiO_3 [14]. Распыление ведется в атмосфере $\text{Ar} + \text{O}_2$ на кремниевую подложку с температурой от комнатной до 700°C . Для практических применений рекомендуется двух- и трехслойные конденсаторы с диэлектриком BaTiO_3 . Предложен ускоренный метод изготовления намотанных металлопленочных конденсаторов [15]. Метод дает также повышение качества и надежности конденсаторов и уменьшение их стоимости. Заготовки конденсаторов помещаются в вакуумную камеру для откачки воздуха из пор применяемых материалов. Затем поры заполняются под давлением газом с высокой электропрочностью (например, элегазом или хладоном-12), что предотвращает возникновение коронного разряда, и герметизируются полимерными капсулами.

Фирмой General Vacuum Equipment (Великобритания) разработана установка для вакуумного нанесения электродов из алюминия, цинка, а также слоев алюминий-цинк-алюминий на диэлектрики для конденсаторов переменного тока.

Предложен способ получения металлизированной полимерной пленки, используемой при изготовлении конденсаторов повышенного качества. Полимерная подложка обрабатывается в плазме в атмосфере инертного газа при давлении $10\text{--}10^{-1}$ Па. Затем на полимерную подложку осаждается тонкая пленка одного из металлов Au , Ag , Cu , Ni , Sn в количестве $0,1\text{--}50$ мг/м^2 , что существенно улучшает адгезию. После этого осаждается алюминиевая пленка. Оптимальная толщина алюминиевой пленки $20\text{--}100$ мкм . Коэффициент гладкости поверхности не хуже 10^{-4} . В производстве металлопленочных конденсаторов используется устройство, обеспечивающее точное расположение масок в установке металлизации. Предложена установка для металлизации с таким устройством.

Широкую пленку из полиэфира, поликарбоната и т.п. электроизоляционного материала металлизуют в вакууме алюминием, цинком или сплавами, содержащими алюминий, цинк, хром. Для получения из такой пленки заготовок конденсаторов при металлизации используют одновременно до 100 лент-масок, которые надеты на две пары приводных роликов и прижаты к металлизированной пленке. Перед узлом металлизации ленты-маски проходят через направляющие гребенки из сплава инвар.

Еще одной функцией применения вакуума является формообразование, при котором разность давлений создает силу, заменяющую механическую. Например, предложена система для производства проводов с круглой или преимущественно прямоугольной токопроводящей жилой (ТПЖ), которая содержит отдающее и приемное устройства и экструдер, обеспечивающий наложение полимера без растворителя в виде трубки продольно вокруг ТПЖ, движущейся от отдающего к приемному устройству. Трубка из полимера плотно накладывается на поверхность ТПЖ с помощью вакуума, создаваемого внутри трубки. При этом в системе предусматриваются устройства для контроля скорости движения ТПЖ относительно головки экструдера и, таким образом, регулирования толщины экструдированной электроизоляции при изменении скорости движения ТПЖ.

4.3. Электротермическое оборудование

В электротехнику входит раздел электротермическое оборудование. Вакуумные электрические печи сопротивления находят все большее применение в промышленности и для проведения научных исследований. Только в НПО «Электротермия» их выпуск в 1991 г. составил более 500 штук и ожидалось дальнейшее увеличение объемов их производства с темпами роста до 10–15% в год [16].

Технический уровень и конкурентоспособность отечественных электропечей во многом зависят от применения в них комплектующего вакуумного оборудования.

В этих печах находят применение:

- вакуумные механические насосы и агрегаты с быстротой действия от 1 до 5000 л/с;
- паромасляные диффузионные и бустерные насосы и агрегаты с быстротой действия от 300 до 15000 л/с;
- вакуумные клапаны с условным проходом от 10 до 100 мм;
- вакуумные затворы с условным проходом от 100 до 630 мм;

- ионизационные, термоэлектрические, деформационные блокировочные вакуумметры;
- гибкие коммутационные линии для вакуумной откачки;
- быстроразъемные вакуумные соединительные элементы.

Потребность в вакуумном комплектующем оборудовании отечественного производства не удовлетворяется, что сдерживает производство вакуумных печей.

Вакуумные электрические печи находят широкое применение в металлургии и более подробные сведения о них содержатся в литературе по этой области техники. Однако некоторые применения печей очень неожиданны, например вакуумная термообработка медицинских имплантеров. Обсуждается возможность и особенности термической обработки в вакуумных электрических печах при их производстве искусственных суставов из современных сплавов [17]. Приведены требования к конструкции печей и вакуумных систем для этой цели. В качестве типичного образца печи, используемой в данной технологии приводится краткое описание печи модели HL-36.

Библиографический список

1. **Веников В. А., Шнейберг Я. А.** Электротехника. Электротехническая промышленность //БСЭ. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1978. Т. 30. С. 114.
2. **Никитин Ю. А.** Электротехническая промышленность //БСЭ. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1978. Т. 30. С. 114.
3. **Серяков К. И. Черемис В. С.** «Вакуумное и электрогазовое коммутационное оборудование // Итоги науки и техники. Сер. Электрические аппараты. 1990. Т. 5. С. 133.
4. **Brann Dieter.** Application criteria for SF₆ and vacuum circuit breakers. Elect. Eng. 1990. Vol. 67. № 7. P. 26, 28, 30, 31, 34.
5. **Kaneko E.** Recent investigation and developments of vacuum circuit — breakers in Japan. Electrotechn and Informationtechn. 1990, Vol. 107. № 3. P. 127—133.
6. **Кучинский Г. С. и др.** Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат. 1987.
7. **Чухонин А. А, Жаворонков.** Аппараты высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. **Холодный С. Д.** Технологическая термообработка изоляции кабеле и проводов. М.: Издательство МЭИ, 1994.
9. **Производство кабелей и проводов.** М.: Энергоиздат, 1981.

10. **Ларина Э. Т.** Силовые кабели и кабельные линии. М.: Энергоиздат, 1984.
11. **Евсеев Ю. А.** Некоторые вопросы применения вакуумирования оборудования в производстве высоковольтных вводов 110—1150 кВ // Тр. Всес. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития вакуумной техники. «Вакуум-91» 21-27.05.91. Т. 2, С. 185.
12. **Ашкиназе Л. А.** Вакуум для науки и техники. М.: Наука, 1984.
13. **Конденсатор** электрический вакуумный // БСЭ. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1978. Т.3. С.7.
14. **Shi Z. O.** Electrical and dielectric properties of thin film BaTiO₂ capacitors deposited by radio frequency magnetron sputtering // J. Vac. Sci and Technol. 1992. Vol. A10. № 4. pt 1. P. 733–736.
15. **Процесс** производства конденсаторов. Пат. 5157820 США, опубли. 27.10.92, РЖ эл. техн. 1994, № 3646711.
16. **Блинов В. П., Сухарев В. А.** Вакуумные электропечи сопротивления — крупный потребитель вакуумного оборудования // Тр. Всес. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития вакуумной техники. «Вакуум-91» 21-27.05.91. Ч.2, Казань, 1991, С. 79.
17. **Carter Gerorgec.** Vacuum heat treating of medical implants // Ind. Heat, 1990. Vol. 57. №3. P. 28, 30–31.

5. ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА В ЭНЕРГЕТИКЕ

Энергетика охватывает области получения, передачи, преобразования и использования различных видов энергетических ресурсов. Наиболее распространенными видами энергетики являются тепловая электроэнергетика, гидроэнергетика и атомная энергетика, включая термоядерную. Особняком стоят генераторы прямого преобразования тепловой и химической энергии в электрическую. Практически в каждой из перечисленных областей находит применение вакуумная техника либо вакуумная технология.

Наиболее широко используемыми являются тепловые электростанции, основой которых служат котельные установки. Топливо транспортируется, измельчается и подсушивается. Подвод тепла и отвод влаги от топлива производится в специальных сушильных установках. По давлению среды в рабочем пространстве сушки разделяются на атмосферные, вакуумные и высоковакуумные — сублимационные [1]. Незначительное количество вещества обрабатывается в

камерных сушилках, а большое количество – в туннельных сушилках непрерывного действия. Основной частью сушилки является удлиненная камера, внутри которой высушиваемый материал перемещается в продольном направлении.

Уголь можно сушить в барабанных сушилках горизонтальных или наклонных цилиндрах, или конических барабанах, вращающихся со скоростью 0,5–8 об/мин. Сушка происходит в условиях низкого вакуума.

Для деаэрации воды, питающей котел, на тепловых электростанциях устанавливают деаэраторы – устройства для удаления растворенных газов. При отсутствии деаэрации воды, подаваемой в парогенераторы, растворенные в воде газы (кислород и свободная двуокись углерода), выделяясь в парогенераторе или тепловой сети, вызывают коррозию металла. Среди средств деаэрации большое распространение получили вакуумные деаэраторы. В работе [2] рассмотрены условия эффективной деаэрации, эффективного нагрева жидкости и гидродинамической устойчивости в вакуумных деаэраторах.

Уральский технологический институт разработал конструкцию трехкамерного вакуумного деаэратора (ТВД) [3]. ТВД обеспечивает ступенчатую деаэрацию воды в трех камерах, имеющих разное давление газа и хорошую вентиляцию паровых пространств.

Работа камеры исключает гидростатическую депрессию, а следовательно, и недогрев, отрицательно сказывающийся на десорбции O_2 и CO_2 . При расширении воды в струях обеспечивается развитая поверхность контакта пара с водой, что в сочетании с развитым вентиляционным потоком (не менее 5–10% расхода воды) обеспечивает глубокую деаэрацию.

Вакуумная технология находит применение при производстве турбогенераторов. Корпорация Chromalloy Gas Turbine Corp. производит упрочняющие покрытия для высокотемпературных турбин [4]. При производстве покрытий используются вакуумные насосы, которые должны откачивать пары, содержащие хлор и частицы силиката. Корпорация с 1990 г. начала использовать для откачки установки KLRC Kinney Vacuum Co. KLRC – двуступенчатая установка, состоящая из двух жидкостно-кольцевых вакуумных насосов типов 304 и 316. В качестве рабочей жидкости насосов используется вода, которая нейтрализуется едким натрием. Установка KLRC работает в 2,5–3 раза дольше, чем установка из чугуна. Остаточное давление $4 \cdot 10^3$ Па. При использовании жидкости с меньшим давлением насыщенных паров можно получить остаточное давление 10^3 Па.

В турбогенераторостроении вакуумная техника находит место также в связи с использованием явления сверхпроводимости [5]. Одной из основных задач при создании сверхпроводящих генераторов является конструирование вакуумной тепловой защиты криогенной зоны с расположенной в ней сверхпроводящей обмоткой и системой подачи криоагента.

Применение сверхпроводящих генераторов может в ближайшем будущем начаться для парогазовых установок и установок на твердом топливе с мощности в 200 МВт, для АЭС при мощности 600–800 МВт. Опытные сверхпроводящие турбогенераторы с начала 80-х годов выпускаются в США, Японии, России.

Достижения в области криогенной техники и техники сверхпроводимости позволяют осуществить технически более совершенные и экономичные решения в области получения сильных токов [6]. Применение криогенной техники в электротехнических и энергетических установках считается будущим криоэнергетики и охватывает следующие области:

1. Производство электроэнергии: МГД-генераторы со сверхпроводящими магнитами, турбогенераторы со сверхпроводящей обмоткой якоря, термоядерные генераторы со сверхпроводящими магнитами.
2. Накопители энергии со сверхпроводящими магнитами.
3. Электропривод: двигатели со сверхпроводящей обмоткой возбуждения, электромагнитные системы подвеса со сверхпроводящими магнитами (транспорт на магнитных опорах).
4. Передача энергии с помощью сверхпроводящего кабеля.

В качестве автономных источников энергии небольшой мощности на космических летательных аппаратах, самолетах, судах и т.д. широко используются электрические генераторы – установки непосредственного преобразования различных видов энергии в электрическую [7]. Суммарная их мощность превосходит мощность всех электростанций вместе взятых.

При производстве термоэлектрических, термоэмиссионных генераторов и солнечных элементов используется вакуумная техника и технология.

Действие термоэмиссионных генераторов (ТЭГ) основано на эффекте Ноттингема. В результате теплового возбуждения электронов происходит термоэмиссия. Конструкция ТЭГ представляет собой два электрода, разделенных небольшим промежутком и включенных в цепь с нагрузочным сопротивлением. Различают вакуумные и газона-

полненные термоэмиссионные генераторы. Для эффективной работы ТЭГ важно хорошее обезгаживание термоэмиссионной сборки, включая электроды. Предложен способ дегазации ТЭГ с эмиттером и коллектором из вольфрама. При достижении с помощью откачки давления остаточного газа (около 10^{-4} Па) начинают плавный подъем мощности. По достижении температуры эмиттера 1900–2000 К производят плавный нагрев коллектора до температуры 1000–1050 К за счет изменения давления газа в системе теплоотвода. Это позволяет удалить с коллектора поверхностные загрязнения. После окончательной дегазации производится напуск паров цезия. Такая процедура позволяет повысить удельную входную мощность с 5 до 8–9,5 Вт/см².

Термоэлектрические генераторы используют эффект Зеебека: в замкнутой цепи, состоящей из разных материалов, протекает электрический ток при разной температуре их контактов. Несколько термопар объединяют в батарею. При создании термоэлементов используется пленочная технология, основным оборудованием которой являются вакуумные напылительные установки, и полупроводниковая технология, также использующая различные типы вакуумных установок. Например, миниатюрный термоэлектрический генератор (ТЭГ) может быть изготовлен с применением технологии производства МОП-приборов [8]. ТЭГ изготавливается на основе монокристаллического кремния на сапфировых подложках и поликристаллического кремния на кварцевых подложках.

Внимание исследователей многих стран уже давно привлечено к разработке эффективных средств преобразования солнечной энергии, практическое использование которой не связано с загрязнением окружающей среды и нарушением теплового баланса планеты [9]. Повышенный интерес к фотоэлектрическому методу преобразования энергии обусловлен реальной возможностью создания стабильной в эксплуатации, дешевой и высокоэффективной солнечной энергии.

Актуальной проблемой современной полупроводниковой солнечной энергетики является создание тонкопленочных солнечных элементов [10]. В полупроводниках с прямыми оптическими переходами коэффициент поглощения излучения столь велик, что поглощение фотоактивной части происходит в слое менее нескольких микрон. В то же время большинство солнечных элементов, изготовленных из монокристаллических полупроводников имеет толщину 200–300 мкм, поскольку применение в массовом производстве более тонких пластин не удается из-за их высокой хрупкости.

В этом разрыве между теорией и практикой возможно таится резерв дальнейшего удешевления солнечных элементов, который может сделать целесообразным и экономически оправданным использование солнечных элементов не только в системах с автономным энергоснабжением космических аппаратов, но и в наземных электрических системах различной мощности.

При производстве тонкопленочных солнечных элементов большую роль играет вакуумная технология. Вакуумное оборудование необходимо, например, при физическом осаждении из паровой фазы - вакуумном испарении. Вакуумная система содержит диффузионные и вспомогательные форвакуумные насосы и должна обеспечивать давление 10^{-4} – 10^{-6} Па. Такая система наиболее часто используется для создания тонких пленок в основном благодаря небольшой стоимости, простоте и высокой скорости откачки. При использовании в диффузионных насосах специальных масел (например, полифенилового эфира), криогенных отражателей и полностью металлической конструкции в системе достигается сверхвысокий вакуум с давлением в диапазоне 10^{-6} – 10^{-8} Па. Другая стандартная сверхвысоковакуумная система основана на применении ионно-распылительного насоса в сочетании с сорбционными и вспомогательными титановыми сублимационными насосами.

Солнечные элементы создаются на основе разных материалов: сульфида меди, тонкопленочного поликристаллического кремния, CdTe, CdS..

При изготовлении солнечных элементов на основе аморфного кремния используется магнетронное ионное распыление, которое также проводится в вакууме.

Изучаются возможности создания солнечных элементов с применением ионного осаждения. Легирование пленок галлием позволяет значительно изменить их удельное электросопротивление. Ионное легирование проводится на установках ионной имплантации, в которые также входит большое количество разнообразной вакуумной аппаратуры: турбомолекулярных и крионасосов и вакуумных измерительных приборов.

Библиографический список.

1. **Арсеньев Т. В.** Энергетические установки. М.: Высш. шк., 1991.
2. **Курнык Л. Н.** Проблемы и перспективы усовершенствования вакуумных деаэраторов // Электр. станции. 1988. № 10. С. 27–31.

3. **Костылев В. Ф.** Совершенствование конструкций и повышение эффективности работы вакуумных деаэраторов в схемах подготовки питательной воды испарителем // Водный режим барабанных котлов и испарительных установок. 1990. С. 94–99.
4. **Stainless-steel vacuum pumps beat acid corrosion** // Chem. Eng. 1993. Vol. 100. № 2. P. 135–136.
5. **Глебов И. А.** Перспективы использования явления сверхпроводимости в турбогенераторостроении // Изв. АН. Энергетика. 1994. № 5. С. 27–42.
6. **Хэфер Р.** Криовакуумная техника. Основы применения. М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. **Арсеньев Г. В.** Энергетические установки. М.: Энергия, 1991.
8. **Kiely J. H.** The design and fabrication of a miniature thermoelectric generator using MOS processing techniques // Meas Sci and Technol. 1994. Vol. 5. № 2. P. 182–189.
9. **Современные проблемы полупроводниковой фотоэнергетики** / Под ред. Т. Коутса. М.: Мир, 1988.
10. **Чопра К.** Тонкопленочные солнечные элементы. М.: Мир, 1986.

6. ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА В УГЛЕДОБЫВАЮЩЕЙ И ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Вакуумная техника в угледобывающей и горнорудной промышленности в основном применяется при откачке и фильтрации агрессивных, токсичных, запыленных и загазованных сред, для транспортировки сыпучих и взвешенных в жидкости металлов.

Наибольшее распространение из вакуумных установок получили вакуум-фильтры при обезвоживании и сушке в водно-шламовом хозяйстве.

Вакуум-фильтр – это аппарат для разделения суспензий, т.е. жидкостей, содержащих твердые частицы во взвешенном состоянии. Разделение происходит в результате разности давлений, создаваемых вакуум-насосом, над фильтрующей перегородкой и под ней. Известны вакуум-фильтры периодического и непрерывного действия. Последний представляет собой горизонтальный вращающийся барабан, который изнутри разделен радиальными герметичными перегородками на отдельные ячейки, соединенные трубками с распределительной головкой. По мере вращения барабана в ячейках создается вакуум или избы-

точное давление. При вращении барабан проходит зону фильтрации, где жидкость засасывается в барабан, а твердые частицы оседают на фильтрующей ткани. После промывания осадка водой барабан входит в зону сушки, где через осадок просасывается воздух, затем в зону удаления осадка. Здесь изнутри барабана подается сжатый воздух, а осадок с поверхности барабана срезается ножом. Известны также дисковые, ленточные, тарельчатые, карусельные и другие типы вакуум-фильтров непрерывного действия.

Широкое применение комплексной механизации при добыче предопределяет непрерывное увеличение выхода мелких классов угля и шламов на углеобогажительных фабриках. Однако обработка и обезвоживание различных шламов является сложным вопросом [1].

Выведение из циркуляции крупнозернистых шламов, сокращение сброса шламовых вод в наружные очистные сооружения, выделение товарной продукции из сбросовых илов возможно при использовании ленточных вакуум-фильтров. Ленточные вакуум-фильтры традиционно относятся к химическому оборудованию и выпускаются предприятиями химического машиностроения. Они выпускались с 1979 г. на заводе «Прогресс», Бердичев.

Выбор вакуумного насоса по производительности осуществляется из условия удельного расхода воздуха на фильтрование и обезвоживание осадка на ленте фильтра, равного примерно $5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

Фирма O & K Aufbereitungstechnik (Германия) поставляет различные типоразмеры ленточных вакуум-фильтров, которые применяются для обезвоживания кварцевых песков, углей, руд, химических реактивов [2]. На этих фильтрах осуществляют противоточную промывку осадка в многостадийном и одностадийном режиме. Для них характерна высокая точность регулировки параметров эксплуатации, разность давлений в пределах 9 кПа.

Фирма Krupp Fordertechnik (Германия) начала производство нового ленточного вакуум-фильтра непрерывного действия типа СН модульной конструкции, что позволяет наиболее эффективно использовать его в конкретных технологических условиях [3, 4]. Фильтр имеет горизонтальную схему расположения. Пульпа поступает на ленту фильтра с расположенным равномерно по ширине вакуумным поддоном, смонтированным на катках. При перемещении поддона в крайнее конечное положение вакуум отключают и поддон переходит в начальное положение. Данный тип фильтра обеспечивает высокую производительность и низкую влажность осадка. Фильтр оборудован системой многостадийной промывки трека, что препятствует забивке фильтроткани.

На предприятиях по добыче угля и песка применяются мокрые процессы их приготовления. В промывочной воде постепенно увеличивается содержание загрязнений, для удаления которых предварительно применяются гидроциклоны, а затем вода направляется в пруды-отстойники, где оставшиеся частицы оседают на дно под действием силы тяжести и добавок коагулянта. Образующиеся на их дне шламы требуют обезвоживания для снижения потерь воды. Для этих операций применяется целый набор вакуумных фильтров и центрифуг [5]. Фильтры могут быть ленточными (расход воздуха $200\text{--}1000\text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, площадь до 65 м^2 , удельная производительность $1\text{--}20\text{ т}/\text{м}^2\cdot\text{ч}$), вакуумно-ленточными ($100\text{--}800\text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, 145 м^2 , $200\text{--}2000\text{ кг}/\text{м}^2\cdot\text{ч}$), барабанными ($100\text{--}500\text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, 90 м^2 , $100\text{--}800\text{ кг}/\text{м}^2\cdot\text{ч}$).

Наряду с ленточными в горно-рудной промышленности используются барабанные и дисковые вакуум-фильтры. В работе [6] установлено, что при обезвоживании железно-рудных концентратов на дисковых вакуум-фильтрах существует экономически выгодная величина их влажности, отличная от наименьшей влажности этих концентратов, полученных при максимальном вакууме. Показано влияние различных схем компоновки вакуум-фильтров и вакуумных насосов на энергоемкость процесса обезвоживания.

Для получения низкой влажности концентрата требуется максимальное значение вакуума на головках вакуум-фильтров [7]. В настоящее время на горно-добывающих предприятиях достигнута величина давления $79,8\text{--}82,5\text{ кПа}$.

Для представления о масштабах использования дисковых вакуум-фильтров отметим, что к 1987 г. на Ингулецком горно-обогатительном комбинате, например, находилось в постоянной эксплуатации 36 вакуум-фильтров типа ДШ68-2,5, подключенных вакуум-проводом параллельно к 12 вакуум-насосам типа ВВН-300, что позволяло поддерживать на головках фильтров давление, равное $74,3\text{ кПа}$. Производительность вакуум-фильтра ДШ68-2,5 составляла $23,7\text{ т}/\text{ч}$. В 1990 г. для обезвоживания железорудного концентрата были применены вновь созданные высокопроизводительные вакуум-фильтры ДШ160-3,2У (производительность – $96,7\text{ т}/\text{ч}$) [8].

В последние годы разрабатываются вакуум-фильтры, в которых в качестве фильтрующего средства используется микрокерамика (размер пор около 1 мкм) [9]. Это позволяет десятикратно снизить энергозатраты на поддержание вакуума по сравнению с обычными фильтрами. Недостатком микропористого вакуум-фильтра является его низкая производительность. Для устранения этого недостатка фильтры

целесообразно устанавливать на второй стадии обезвоживания. Для увеличения движущей силы процесса используется сочетание в одном аппарате фильтра под давлением и вакуумного. Подача избыточного давления в объем вакуум-фильтра позволяет удвоить производительность.

Для улавливания пыли и других механических примесей из воздуха в системах вентиляции и в промышленных установках очистки газов в угледобывающей и горно-рудной промышленности применяются пылеулавливатели. Пылеулавливатели фирмы Debus Druckluft - Vakuumtechnik GmbH представляют собой промышленный пылесос с трехмоторным приводом, производящий всасывание со скоростью 9000 л/мин, при давлении 2200 мм вод. ст. [10]. Пылесос оснащен системой защиты электропитания от перегрузок. Фильтр состоит из элементов в форме патронов с общей поверхностью фильтрации 15 м². Для очистки пылесоса от пыли служит специальный компрессор, создающий давление воздуха до $7 \cdot 10^{-1}$ Па и очищающий фильтры с помощью магнитных вентилях. Был разработан всасывающий пылеприемный насадок для использования в металлургической, горной и других видах промышленности, применяющих вакуумную пылеуборку.

Вакуумные насосы в угольной промышленности используют также для дегазации шахт [11]. Отсос, сбор и вывод из подземных горных выработок на поверхность рудничного газа производится по проложенным в горных выработках трубопроводам или по буровым скважинам, соединяющим выработки с поверхностью. Дегазационное оборудование располагается на поверхности шахт и состоит из вакуум-насосов или ротационных воздуходувок с неискрящимися лопатками, обеспечивающими движение газа в дегазационной системе, приводов к ним и аппаратуры, регулирующей и контролирующей работу машин и приводов.

Применение дегазации шахт привело к созданию новой технологии разработки газоносных угольных пластов с учетом попутной добычи метана. При предварительной дегазации шахт проводится бурение параллельных скважин глубиной по 100 – 200 м и диаметром 80 – 120 мм с интервалом 10 – 25 м. Каждая дегазационная скважина через водоотделитель присоединяется к шахтной сети газопроводов. Отсос газа из угольного пласта производится под давлением 1 – 2 Па в течение длительного периода времени (свыше 100 – 150 суток).

Еще одной областью применения вакуума в горно-рудной промышленности является пневмотранспорт. Пневмотранспортные установки могут использоваться для транспорта мелкокусковых и пылевидных горных пород и руд на внутрифабричных транспортных коммуни-

кациях [12]. Различают всасывающие и нагнетательные пневмотранспортные установки. В зависимости от условий эксплуатации пневмотранспортные установки выполняют стационарными и передвижными. Производительность стационарных установок достигает $125 \text{ м}^3/\text{ч}$ дробленых пород при длине транспортирования до 1500 м. Производительность передвижных установок до $40 \text{ м}^3/\text{ч}$ при длине транспортирования до 400 м. Для создания разности давления в трубопроводе в установках низкого давления (до $3 \cdot 10^5$ Па) нагнетательного типа или разрежения (до $0,5 \cdot 10^5$ Па) в установках всасывающего типа применяют воздухоудовки.

На обогатительных фабриках пневматический транспорт нашел широкое применение для перемещения концентратов руд различных металлов в виде аэросмесей, погрузки и разгрузки сыпучих и пылевидных материалов, удаления пыли. В зависимости от протяженности пневмопривода для работы установок всасывающего типа необходимо разрежение до 0,05 МПа [13]. Под действием разрежения, создаваемого вакуум-насосом (вентилятором, воздухоудовкой), атмосферный воздух засасывается через сопло, увлекая транспортируемый материал.

Фирма Bio-Tech Ltd (США) специализируется в области производства оборудования для нагнетательных и вакуумных пневмотранспортных установок, включая колена для транспортного трубопровода, муфтовые соединения и арматуру [14].

Возможно использование выпускаемого оборудования и арматуры в установках для транспортировки абразивных и мелкозернистых грузов. Фирма J.Schmel GmbH (Германия) предлагает регулятор степени вакуума в пневмотранспортных установках типа VR3-8, благодаря которому обеспечивается заданная степень вакуума независимо от колебаний в системе [15].

В Германии предложен сепаратор, предназначенный для установки на входе емкости-сборника, используемый в установках вакуумного типа для пневмотранспорта зернистых грузов.

В США запатентован вакуумный транспортер со специальным тангенциальным сепаратором для эффективного удаления, сбора, сепарирования и размещения влажных, сухих и волокнистых материалов, включая жидкости и пульпы, преимущественно на горных предприятиях.

В Германии запатентована пневмотранспортная установка вакуумного типа, осуществляющая дозированную подачу нескольких видов сыпучего материала нескольким потребителям, а также вакуумный насос. Установка соединяет несколько емкостей, в каждую из которых поступает вещество, освобожденное от несущего воздуха, дозируется

и направляется потребителю. Между емкостями и сепараторами располагается распределитель, в который сходятся пневмопроводы от емкостей и сепараторов.

Для горных предприятий особую роль играют системы электроснабжения, их надежность и безопасность. В отечественной и зарубежной практике широкое применение получили вакуумные коммутационные аппараты (ВКА) – контакторы и выключатели, позволяющие существенно повысить надежность электроснабжения и снизить эксплуатационные затраты на ремонт и обслуживание [17]. Преимущества ВКА в наибольшей степени проявляются в электроустановках с частыми коммутациями и тяжелым режимом работы.

В вакуумных аппаратах контактная система помещается в специальную камеру, в которой поддерживается вакуум порядка $10^{-3} - 10^{-5}$ Па. Электропрочность межэлектродного промежутка в вакууме во много раз выше, чем в воздухе при атмосферном давлении и поэтому дугу между контактами можно погасить при небольшом ходе контактов.

Библиографический список

1. **Иванов П. Н.** Применение ленточных вакуум-фильтров на обогатительных фабриках // ЦНИИУголь. Серия «Обогащение и брикетирование угля». 1981.
2. **Filtration** and dewatering with vacuum // Mining Mag., 1991. Vol. 165. №3. P. 174–175.
3. **Krupp** Fordertechnik offers... // Eng and Mining J. 1994. Vol. 195. № 5. P. 82
4. **Vacuum** filter belt for solid-liquid separation // Mining J. 1994. Vol. 332. № 8269. P. 237.
5. **Franze Ulrich.** Maschinen zur Entwasserung von Schlamm und wasserkeislaufen // Schweiz. Baust. Ind. 1994. Vol. 25. № 3. P. 22–26.
6. **Виноградов Б.В.** Факторы влияющие на технико-экономические показатели работы, обезвоживания руд на дисковых вакуум-фильтрах // Металлургия и горнорудная промышленность. 1990. № 4. С. 40–41.
7. **Чуянов Г.Г.** Обезвоживание, пылеулавливание и охрана окружающей среды. М.: Недра, 1987.

8. **Товстановский О. Д.** Освоение технологии обезвоживания железорудных концентратов на вакуум-фильтрах ДШ 160–3,2У // Черная металлургия. 1990. № 10. С. 41–44.
9. **Vickers F.** The flotation and dewatering of fine coal Pt. 2 // Mine and Quarry. 1990. № 5. P. 28–30.
10. **Straubsauger** fur Feinstaub // Gluckauf. 1991. Vol. 127. № 3 – 4. P. 84.
11. **Айруни А. Т.** Дегазация шахт // БСЭ. 2-е изд. Т. 8. С. 8–9.
12. **Григорьев В. Н.** Транспортные машины для подземных разработок. М.: Недра, 1984.
14. **Батаногов А. П.** Воздушное хозяйство обогатительных фабрик. М.: Недра, 1984.
15. **New** wear resistant bend // Bulk Handl. 1989. Vol. 16. № 2., P. 53.
16. **Stufenlos** ienstellbarer Vakuumregler // Fordertechnik. 1993. Vol. 62. № 12. P. 30.
17. **Разгильяев Г. И., Курехин В. В.** Вакуумные выключатели в схемах электроснабжения горных предприятий. М.: Недра, 1994.

7. ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

К электрофизическим установкам относятся электронные и ионные ускорители, ускорительно-накопительные комплексы, столкновители, термоядерные реакторы и другие системы, предназначенные для фундаментальных и прикладных исследований строения материи, физико-технических основ энергетики, физики плазмы и пр. Так, например, ускорители используются для исследования свойств элементарных частиц в лучевой терапии, дефектоскопии, термоядерные реакторы – для исследований возможности получения управляемой термоядерной реакции. При создании электрофизических установок определяющим фактором являются вакуумные условия [1]. Так, фоновое давление в термоядерных реакторах с магнитным удержанием плазмы не должно превышать 10^{-8} – 10^{-6} Па при объеме камер 300–800 м³ и площади стенок до 1000 м². Быстрота действия сверхвысоковакуумных откачных систем превосходит 10⁴ м³/с. Требуемое остаточное давление в накопителях и столкновителях составляет 10^{-9} – 10^{-7} Па при очень малой, около 50–80 мм, апертуре вакуумных камер, их протяженности в сотни и тысячи метров и интенсивном газовыделении со стенок. Жест-

кие ограничения накладываются на парциальный состав газовой среды. Она не должна содержать углеводородов и компонент с большим атомным номером. Вакуумные системы электрофизических установок состоят из следующих основных элементов:

- вакуумной камеры, в которой осуществляются основные физические процессы: ускорение, транспортировка и накопление заряженных и нейтральных частиц, формирование и нагрев плазменных сгустков, поддержание электрического разряда в разряженных газах;
- системы вакуумной откачки, включающей основные и вспомогательные средства вакуумирования камеры на различных этапах рабочего цикла;
- коммутационно-регулирующей аппаратуры, обеспечивающей контролируемую подачу в камеру рабочего газа, управление газовыми потоками, разделение вакуумного тракта на отдельные участки и т.д.;
- системы вакуумметрии и газоанализа;
- системы контроля герметичности вакуумного тракта;
- системы управления.

В зависимости от структурно-физических, конструктивных и эксплуатационных особенностей вакуумные системы электрофизических установок делятся на два класса. Первый – вакуумные системы с сосредоточенными параметрами, – включает системы с преимущественно дискретным расположением средств откачки, присоединенных к компактной камере большого объема с помощью сравнительно коротких трубопроводов, и локализованной газовой нагрузкой. Второй – вакуумные системы с распределенными параметрами – включает системы на основе протяженных и структурно-периодических вакуумных камер с распределенной газовой нагрузкой и встроенными в камеру протяженными насосами.

7.1. Вакуумные системы ускорителей и ускорительно-накопительных комплексов

Вакуумная система ускорительно-накопительного комплекса Института физики высоких энергий на энергию 3ТэВ построена следующим образом. Камеры обеих ступеней изготовлены из тонкостенных трубчатых заготовок из нержавеющей стали [2]. Внутренняя поверхность электрохимически полирована. Заготовки отжигают при 1200 К в вакуумных печах с безмасляной системой откачки при давлении 10^{-4} Па. После сборки магнитных блоков секции подвергаются ионной обработке. Интегральная плотность ионного потока на стенку не

должна превышать $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Для независимой наладки отдельных секций в камере с шагом 90–100 м установлены разделительные шиберные затворы на металлических уплотнениях. Монтируются также клапаны для подсоединения постов предварительной откачки, вакуумметрические и масс-спектрометрические преобразователи и т.д. Основное средство получения требуемого давления $3 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$ – ионно-геттерные насосы с быстротой действия 0,16–1,0 м³/с. Предварительная откачка осуществляется постами на основе турбомолекулярных насосов.

Важная особенность вакуумной системы электронного накопителя-растяжителя НР-200 – применение камеры из алюминиевого сплава, изготовленной экструзионным методом. В накопитель из линейного ускорителя с частотой 300 Гц инжектируется электронный сгусток с временной протяженностью 1,4 мкс. В зависимости от режима работы требуемое давление в камере колеблется от $1,3 \cdot 10^{-6}$ до $1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$; предельное остаточное давление (без пучка) – $1 \cdot 10^{-8} \text{ Па}$. Для откачки накопителя используются сверхвысоковакуумные комбинированные ионно-геттерные насосы и посты предварительной откачки на основе турбомолекулярных насосов.

7.2. Вакуумные системы термоядерных установок

Основными элементами вакуумной системы термоядерного комплекса, например, крупнейшего в мире отечественного комплекса со сверхпроводящей обмоткой тороидального магнитного поля – токамака Т-15 являются разрядная камера, криостат, инжекторы быстрых нейтральных атомов и блоки откачки. В вакуумный тракт входят также элементы систем ВЧ-нагрева плазмы, напуска газа, криогенный и диагностический комплексы [2, 3]. Для формирования плазменного шнура и локализации областей взаимодействия плазмы со стенками внутри тороидальной разрядной камеры установлены подвижные и неподвижные диафрагмы из графито-содержащих композиций.

Фоновое давление в камере примерно 10^{-6} Па . Расчетные значения удельной скорости газовыделения примерно $4 \cdot 10^{-10} \text{ м} \cdot \text{Па}$. Десорбционные характеристики обеспечиваются комплексной вакуумно-технологической подготовкой камеры. Сюда входят обезжиривание, полировка, наладка и эксплуатация.

Для удаления окисных пленок используется индукционный разряд в водороде и кольцевой тлеющий разряд последовательно в криптоне.

Основным средством откачки трех инжекторов быстрых нейтральных атомов, в состав которых входят вакуумная камера объемом 25 м^3 , шлюзовые камеры ионных источников, магнитный сепаратор и прочее, являются встроенные криопанели с суммарной быстротой действия около $10 \text{ м}^3/\text{с}$; рабочая температура панелей $3,8 \text{ К}$.

Откачка криостата, обеспечивающего вакуумную тепловую изоляцию сверхпроводящих и криорезистивных обмоток магнитов, и элементов криогенного оборудования осуществляется модулями на базе турбонасосов с быстротой действия $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

7.3. Средства откачки электрофизических установок

Для высоко- и сверхвысоковакуумной откачки современных электрофизических установок и комплексов используются промышленные насосы всех типов. Однако приоритет отдается безмасляным насосам поверхностного действия – электрофизическим и крионасосам. Это обусловлено, во-первых, резко отрицательным влиянием паров и конденсатов масел на эксплуатационные характеристики и надежность вакуумных систем электрофизических установок и, во-вторых, возможностью осуществления практически неограниченной скорости действия.

Для сверхвысоковакуумной откачки сильноточных протонных ускорителей разработаны испарительные насосы на основе плазменных электродуговых источников геттерных пленок [2]. Они имеют быстроту действия до $200 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для получения давлений ниже 10^{-10} Па , требуемых на участках встреч пучков в накопителях, разработаны сверхвысоковакуумные криогенные насосы с быстротой действия $5\text{--}10 \text{ м}^3/\text{с}$ (по водороду). Одна из своеобразных модификаций таких средств откачки – линейный крионасос, представляющий собой протяженный прямой канал с фланцами на торцах, центральная часть которого охлаждается жидким гелием при температуре $4,2 \text{ К}$. Подобный насос может обеспечивать предельное остаточное давление примерно 10^{-12} Па .

Системы откачки большинства экспериментальных термоядерных установок строятся на основе безмасляных средств откачки промышленных типов. Исключение составляют открытые ловушки и инжекторы быстрых нейтральных атомов, для которых типично применение сверхвысоковакуумных насосов поверхностного действия – крионасосов, испарительных геттерных и на основе нераспыляемых геттеров, с быстротой действия до $5 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для откачки водорода наиболее перспективны конденсационные и криосорбционные насосы и нераспыляемые металлические геттеры. Криосорбционная откачка изотопов водорода может осуществляться при температурах 10–30К. В качестве криосорбентов используют микропористые адсорбенты - угли, цеолиты, а также слои отвердевших легкоконденсируемых газов.

В последние годы успешно применяют нераспыляемые геттеры, которые используются в виде линейных геттерных насосов или откачных модулей. Интерес к нераспыляемым геттерам обусловлен возможностью отказаться от традиционных геттеров, которые имеют высокую температуру во время откачки.

Первые крупномасштабные применения нераспыляемых геттеров в вакуумных системах ускорителей состоялись на Брукхэвенской линии транспортировки тяжелых частиц [4] и на большом электронно-позитронном ускорителе в Церне [5].

В Брукхэвенской линии длиной 700 м между ускорителем Tandem и сильнодействующим синхротроном AG-S были установлены ленточные геттерные насосы очень простой конструкции, удобные в обслуживании и недорогие (\$1 на л/с). Нагрев вакуумной камеры и геттера осуществляется резистивным методом. Давление в линии сначала снижалось с помощью турбомолекулярных насосов до 10^{-3} Па, затем с помощью ленточных геттерных насосов до 10^{-8} Па.

Применение нераспыляемого геттера совместно с магниторазрядными и титановыми сублимационными насосами позволило улучшить вакуумные характеристики электронно-позитронного накопительного кольца синхротрона Photon Factory в Японии и получить давление 10^{-9} Па [6].

Достаточно широкое применение в электрофизическом аппаростроении нашли также промышленные компримирующие насосы, прежде всего турбомолекулярные [2].

Использование паромасляных диффузионных насосов ограничено циклотронами на легких ионах и некоторыми модификациями ускорителей импульсного действия. В качестве рабочей жидкости в диффузионных насосах используется обычно полифениловый эфир, либо другие вещества с пониженной упругостью пара.

Применение парортутных насосов лимитируется в основном токсичностью ртути. В термоядерных установках ртуть как рабочее вещество недопустима, в принципе, из-за очень большого атомного номера.

Все большее распространение для откачки электрофизических установок находят турбомолекулярные насосы. При создании ускорителей турбомолекулярные насосы применяются, главным образом, как средство предварительной откачки сверхвысоковакуумных ускорительно-накопительных комплексов и столкновителей. Типичная быстрота действия этих насосов не превышает $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$; остаточное давление, достигаемое в камере постами предварительной откачки на базе турбонасосов близко к 10^{-6} Па. Турбомолекулярные насосы с быстротой действия до $10 \text{ м}^3/\text{с}$ – основное средство откачки экспериментальных установок управляемого термоядерного синтеза. При использовании турбонасосов в термоядерных реакторах возникают трудности, обусловленные, во-первых, малой предельной единичной быстротой действия $25\text{--}30 \text{ м}^3/\text{с}$, и, во-вторых, взаимодействием смазочных масел подшипников с трением.

7.4. Вакуумные технологии электрофизического аппаратостроения

Сварка занимает особое место среди вакуумных технологий. Протяженность вакуум-плотных сварных швов в крупных ускорителях и термоядерных комплексах достигает многих сотен и тысяч метров [2], поэтому их надежность оказывает решающее влияние на эксплуатационные характеристики вакуумного тракта. Основной метод устойчивого получения высоконадежных сварных швов в деталях и сборках вакуумного тракта электрофизического аппаратостроения – электродуговая сварка неплавящимся электродом в защитной среде инертного газа (аргона или гелия).

Гелий применяется при сварке материалов с высокой теплопроводностью (медь, сплавы алюминия), когда необходима большая удельная мощность дуги. В качестве электрода обычно используется вольфрам, легированный лантаном или иттрием.

Если катет шва не превышает $1,5 \text{ мм}$, то процесс сварки сводится к оплавлению кромок соединяемых деталей. Сварка оплавлением оптимальна при изготовлении деталей с толщиной стенки от $0,8$ до 5 мм . Нагрев деталей производится в резистивных либо индукционных вакуумных печах.

Тренировка вакуумных систем – специфический этап технологии вакуумирования электрофизических установок. Роль тренировки особенно важна в накопителях и термоядерных установках, где наиболее высока интенсивность корпускулярных и электромагнитных потоков, падающих на стенки. Её назначение – сформировать близкую к

атомарно чистой поверхность камеры, ограничив тем самым поступление в систему газовых потоков десорбционного происхождения. Для эффективной тренировки вакуумных систем необходимо сочетать традиционные методы физико-химической очистки поверхности, термическое обезгаживание и обработку стенок быстрыми частицами либо электромагнитным излучением.

Для вакуумных систем электрофизических установок характерно применение разнообразных материалов [2]. Вакуумные камеры протонных синхротронов и экспериментальных термоядерных установок выполняются обычно из прецизионных немагнитных сплавов с высоким удельным электросопротивлением.

В электронных синхротронах используются камеры из металлических сплавов или алюмооксидной керамики. Диафрагмированные волноводы линейных ускорителей электронов и высокочастотных сепараторов изготавливают из бескислородной меди.

Ускорительные трубки высоковольтных ускорителей представляют собой набор диэлектрических колец из высоковольтного фарфора и электродов из нержавеющей стали, алюминия или титана, торцевые стыки которых герметизируются с помощью клеев, пайки или сварки.

Ионно- и электроприводы, каналы вторичных пучков, камеры экспериментальных стендов выполняются из нержавеющей стали и алюминиевых сплавов. В вакуумных камерах устанавливают подвижные и стационарные магнитные диполи и линзы, мишени, пробники, отклоняющие электроды, датчики для измерения параметров пучков и другие устройства, в которых используются полимерные материалы, ферриты, керамика, герметики различных типов, теплозащитные или полупроводящие покрытия и другие материалы и композиции.

Алюминий и его сплавы – наиболее подходящие конструкционные материалы для сверхвысоковакуумных систем, работающих в диапазоне действий 10^{-8} – 10^{-11} Па. Чистый алюминий и сплавы алюминия имеют предельно низкую скорость газовой выделенности, не изменяют кристаллическую структуру при низких температурах, имеют малую остаточную радиоактивность в радиационной окружающей среде и малый удельный вес. Благодаря высокой теплопроводности и малому коэффициенту излучения изделия из алюминия и его сплавов выдерживают высокие тепловые потоки при относительно низкой температуре плавления.

В современной сверхвысоковакуумной технике применяются алюминий-магний-кремний-кремниевые сплавы и алюминий-магний-кремний-кремний-кремниевые сплавы и алюминий-магний-кремний-кремний-кремниевые сплавы.

сплав для стенок камер. Первым применением на практике технологии сверхнизких давлений было сооружение электронного синхротрона TRISTAN. Он был сконструирован полностью из алюминиевых сплавов японской Национальной лабораторией физики высоких энергий, для изготовления профилей синхротрона сложной конфигурации был разработан новый метод экструзии алюминиевых сплавов [7].

Экструзия осуществляется в среде, состоящей из 7% O_2 и 93% Ar . В процессе обработки на поверхности образуется тонкий (30 Ангстрем), плотный слой окисла. Процесс обработки поверхности из сплавов алюминия в кислородно-аргоновой среде назван EX-процессом. Применяется EX-процесс в сочетании с нагреванием [8].

Термическая обработка значительно снижает газовыделение. Если до прогрева скорость газовыделения составляла $10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{л} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-2}$ после 10 часов откачки, то после прогрева (150°C , 24 ч) она снижалась до $10^{-11} - 10^{-12} \text{ Па} \cdot \text{л} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-2}$.

В Токийском исследовательском институте средств связи недавно разработана эффективная технология полирования до зеркального блеска поверхностей из алюминиевых сплавов, получившая название органо-механохимическое полирование (ОМХП) [9]. В вакуумной камере, внутренние поверхности которой были отполированы методом ОМХП, было достигнуто давление $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ Па}$ после 48 часов откачки тандемом из двух турбомолекулярных насосов с быстротой действия 340 л/с и 60 л/с. При откачке камеры турбомолекулярными насосами в сочетании с титановым сублимационным насосом давление снизилось до $4,9 \cdot 10^{-11} \text{ Па}$.

7.5. Оборудование для исследования физики плазмы

Для исследования физики плазмы разрабатываются различные исследовательские установки. Так, в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований создан многоканальный вакуумный спектрограф для исследования пространственной анизотропии излучения в импульсных рентгеновских излучениях [10]. Потребность в приборе такого типа обусловлена, в частности, необходимостью анализа степени анизотропии рентгеновской эмиссии при изучении возможности использования плазмы сильноточного Z-пинча в качестве лазерной среды для генерации коротковолнового излучения.

В конструкцию спектрографа входят: источник рентгеновского излучения, блок входных щелей, вращающаяся платформа, диспер-

гирующие элементы, узел удвоения угла, полупроводниковые детекторы, выходные окна, узел перемотки фотопленки, фотопленка, регистрирующая аппаратура.

Для нагрева плазмы в проектируемых термоядерных установках предполагается использовать стационарную инъекцию потоков нейтральных частиц с энергией около 1 МэВ и с эквивалентным током до 10 А. Такие инжекторы могут быть созданы лишь на основе пучков отрицательных ионов соответствующих параметров. С этой целью в Институте ядерной физики АН Украины разработан перспективный плазменный источник отрицательных ионов водорода [11]. В конструкцию источника входят накаливаемый катод, катодная диафрагма, извлекаемый электрод, отверстие для напуска газа, разрядная колонна, антикатод, таблетка двуххромовокислого цезия. Давление водорода в камере источника варьировалось в пределах $2 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-1}$ Па; напряжение разряда – от 100 до 200 В. Источником электронов служил накаливаемый вольфрамовый катод.

Американская фирма Physical Sciences разработала метод ИК-эмиссионной спектроскопии потоков с обеспечением высокой разрешающей способности [12]. Это обеспечивает определение концентраций и температур вдоль линий тока в высокоэнthalпийных сверхзвуковых потоках. С помощью специального спектрометра полученные данные, относящиеся к температурам 3000 – 4000 К и давлениям 1–4 МПа, хорошо согласуются с результатами, полученными методом лазерной флуоресценции. В настоящее время метод применяется также для измерений концентраций H_2O в космической системе, работающей на водороде.

Представляет интерес разработанный в Институте физики Белорусской АН однолучевой абсорбционный ИК-газоанализатор для определения концентрации газов в пламени и нагретых струях продуктов сгорания различных видов топлива в ракетных, газотурбинных и других двигателях.

Библиографический список

1. **Саксаганский Г. Л.** Вакуумная техника и технология. Ч. I. М.: НТО Приборпром. 1989.
2. **Саксаганский Г. Л.** Вакуумная техника и технология. Ч. II. М.: НТО Приборпром. 1990.
3. **Инженерные** проблемы установок ТОКАМАК. М.: Энергоатомиздат. 1986.

4. **Hseuh H. G.** Experience with NEG strips at the brookhaven heavy ion transport line // American Institute of Physics. 1988.
5. **Grobner O.** The design and performance of the LEP vacuum system at CERN // Vacuum. 1992. Vol. 43. № 1–2. P. 27–50.
6. **LEP Vacuum Group.** LEP Vacuum System: present status // Vacuum. 1990. Vol. 41. № 7–9. P. 1882–1886.
7. **Ishimaru H.** Developments and Application for All-aluminium alloy vacuum systems // MRS bulletin. 1990. July.
8. **Ohi T.** Vacuum property of aluminium alloy chamber treated with electropolishing and machining in dry atmosphere // Vacuum. 1990. Vol. 33. № 5. P. 514–519.
9. **Suemitsu M.** Development of extremely high vacuum with mirror-polished Al-alloy chambers // Vacuum 1993. Vol.44. № 5–7. P. 425–428.
10. **Дедова О.Л.** Многоканальный вакуумный спектрограф для исследования пространственной анизотропии излучения в импульсных рентгеновских излучениях // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 1. С.95–97.
11. **Горицкий В.П.** Плазменный источник отрицательных ионов водорода // Физика плазмы. 1994. № 9. С.836–848.
12. **Rawlins W.** Time-Resolved infrared emission spectroscopy in high-enthalpy supersonic air flows // AIAA Journal. 1993. Vol.31. № 3. P.492–504.

8. ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИМИТАЦИИ УСЛОВИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Космический вакуум – разреженная космическая газообразная материя - оказывает разнообразные воздействия на материалы, узлы и блоки бортовых научных приборов, находящихся вне гермоотсеков космических летательных аппаратов [1, 2]. Так как эти приборы представляют собой очень сложные оптико-механические, электрические и электронные устройства, даже знание детальных вакуумных характеристик составных частей не позволяет на современном этапе заранее предсказать те или иные особенности их поведения в космическом полете. Поэтому единственным приемлемым на сегодняшний день способом их подготовки к полетам являются тщательные предполет-

ные исследования и испытания в специальных наземных установках, моделирующих воздействия космического вакуума. Эти моделирующие установки можно разделить на следующие три группы [3]:

1. Установки тепловакуумных испытаний предназначены для исследования тепловых балансов космического аппарата. Температура поверхностей космического аппарата при испытаниях должна быть в диапазоне от 10 до 30°C. Рабочие давления при этих испытаниях примерно $10^{-3} - 10^{-4}$ Па. Кроме того, имитируются солнечные и другие электромагнитные излучения космоса.

2. Установки вакуум-температурных испытаний, в которых космический аппарат испытывается при экстремально низких давлениях (менее 10^{-6} Па) и экстремальных температурах цикла (обычно от минус 70 до 90°C).

3. Специальные установки, предназначенные для исследований космического материаловедения. В них проводятся исследования материалов, узлов и элементов космического аппарата: поверхностных явлений при давлении примерно $10^{-11} - 10^{-12}$ Па; калибровка бортовых научных приборов в условиях, приближенных к космическим (при давлении около $10^{-5} - 10^{-6}$ Па); новых типов двигателей на химическом топливе, ионных и плазменных двигателей и прочее.

8.1. Вакуумные системы установок

Для создания условий, моделирующих космический вакуум, необходимы специальные вакуумные системы, предназначенные для откачки паров и газов, выделяющихся из испытуемых космических аппаратов, и поддержания в них рабочих давлений, вплоть до 10^{-12} Па. В комплект вакуумных систем входят насосы основной, вспомогательной и предварительной откачки. Насосы предварительной откачки предназначены для начального вакуумирования установок (от 10^5 до 10^{-1} Па). После начинают действовать насосы основной и вспомогательной откачек ($10^{-3} - 10^{-12}$ Па), а насосы предварительной откачки, как правило, при этом отсекаются и отключаются.

В качестве насосов основной откачки используются насосы поверхностного действия, использующие в максимально возможной степени внутреннюю поверхность установки. Главным образом, основная откачка осуществляется встроенными криогенными конденсационными насосами. В качестве насосов вспомогательной откачки в современных установках используются комбинации насосов различных типов, в которых каждый тип насоса используется, главным образом, для откачки одного (или двух) определенных газов. Например, в

такой системе пары H_2O и CO_2 могут откачиваться конденсацией на криоповерхностях, охлаждаемых до температур жидкого азота; H_2 - титановым адсорбционным насосом; инертные газы (Аг, Кг, Хе) геттер-ионным насосом и пр. Предварительная откачка обычно осуществляется механическими насосами, при этом линии форвакуумной откачки оснащаются ловушками, охлаждающимися жидким азотом; цеолитовыми ловушками и другими устройствами, предохраняющими откачиваемый объем в максимальной степени от попадания в него паров масел.

Криогенные системы применяются для моделирования поглощения излучения космического аппарата космосом и осуществления в установках криогенной вакуумной откачки.

В число имитаторов электромагнитных излучений входят, главным образом, имитаторы Солнца, а также имитаторы планет. Имитатор Солнца представляет собой сложную оптическую систему, предназначенную для воспроизведения в рабочей зоне моделирующей установки лучистого потока, имеющего спектр приближающийся к спектру Солнца. Имитаторы Солнца крупных установок содержат большое количество ламп (дуговые, накаливания) в качестве источников излучения, линзы для ввода излучения в установку, интегрирующие ячейки и зеркала для формирования в установке пучка параллельного излучения, моделирующего солнечное, с максимальной равномерностью и параллельностью излучения в пучке. Имитаторы планет – оптические устройства, излучающие в инфракрасном спектральном диапазоне. Они имитируют собственное излучение Луны и планет.

Имитаторы орбиты представляют собой механические устройства, позволяющие менять ориентацию испытываемого комплексного аппарата относительно потока солнечного излучения в установке. Они выполняются в виде двух- и трехстепенных карданных подвесов.

В настоящее время наиболее широко применяется крупногабаритная установка модели CST моделирования космоса Европейского космического агентства в Тулузе (Франция), в которой совмещены возможности проведения термовакуумных и вакуум-температурных испытаний космического аппарата. Установка состоит из двух, соединенных между собой, отсеков – вертикального цилиндрического отсека (основной камеры) и горизонтального цилиндрического отсека для размещения систем откачки и имитатора Солнца (дополнительной камеры). Внутренние поверхности отсеков закрыты тепловыми экранами, состоящими из плоских или изогнутых волнистых криопанелей.

Одной из особенностей экранов является подвижная часть с вертикальными поворотными створками, разделяющая экраны двух отсеков. Это позволяет изолировать экраны обоих отсеков между собой во время вакуум-температурных испытаний, т.е. без действия имитатора Солнца. При этом экран дополнительной камеры используется как азотный криоконденсационный насос с температурой 80 К. Температура экрана основной камеры в ходе этих испытаний может изменяться от 100 до 360 К. Система вакуумной откачки является полностью "безмасляной". Предварительная откачка осуществляется двумя параллельными форвакуумными линиями, оснащенными двухпорторными насосами с объемной быстротой действия $1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ с прогреваемыми цеолитовыми ловушками и отсекающими клапанами. При достижении давлений около 1 Па начинают охлаждение жидким азотом экранов дополнительной камеры. После достижения давлений примерно 10^{-1} Па насосы предварительной откачки отсекаются клапанами и отключаются. При достижении давления $5 \cdot 10^{-1}$ Па включают криогенный и турбомолекулярный насосы, располагающиеся снаружи дополнительной камеры. При давлении примерно $5 \cdot 10^{-2}$ Па включают титановые испарительные насосы основной откачки. Титан напыляется на панели. Рабочее давление $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Для изменения температуры экранов путем прокачки через них газообразного или жидкого азота используется тепловой генератор.

Имитатор Солнца создает цилиндрический пучок излучения. Двухступенный имитатор орбиты обеспечивает вращение испытуемого космического аппарата вокруг вертикальной и горизонтальной осей.

8.2. Космическая технология

К числу основных процессов космической технологии относятся: космическое материаловедение, космические исследования, ремонтно-восстановительные работы в космосе. В настоящее время оборудование для проведения в космических условиях плавки материалов, электрофореза, кристаллизации, а также исследований чисто научного характера по существу представляет собой лабораторное оборудование и является, как правило, аналогом уже существующих наземных установок.

По мере развития космической технологии будет совершенствоваться существующее оборудование и создаваться совершенно новое, например, для получения материалов в промышленных масштабах. Полезное использование вакуума в процессах космической тех-

нологии заключается в откачке камеры, расположенной на борту космического аппарата [2]. Присоединяя непосредственно к камере автономные высоко- и сверхвысоковакуумные насосы, рабочее давление даже при таких сложных процессах, как плавка металлов, можно поддерживать на уровне от $1 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ Па для проведения экспериментов при давлении около 10^{-12} Па необходимо устройство теневой защиты. Это устройство представляет собой полусферическую оболочку, ориентированную таким образом, чтобы открытая часть полусферы располагалась сзади по направлению вектора скорости космического аппарата и, следовательно, внутренняя часть полусферы экранировалась бы от набегающего газового потока. Устройство должно располагаться на телескопической штанге, выдвигающейся из орбитального космического аппарата на расстояние до 100 м, либо на свободно летящих в космосе непилотируемых технологических космических аппаратах. Полусферическая форма защиты в связи с наиболее благоприятным соотношением её площади и объема способствует получению экстремально высокого вакуума.

Космические условия, характеризующиеся наличием микрогравитации, высокого вакуума, обилием энергии ($1,4 \text{ кВт/м}^2$), используются главным образом для изготовления материалов в космосе. При изготовлении материалов отсутствуют тепловая конвекция, выпадение осадка, гидростатическое давление, не требуется применение тигля для плавки материала, можно использовать неограниченный вакуум. Так, отсутствие конвекции способствует улучшению характеристик сепарации при электрофорезной кристаллизации и росту кристаллов при наличии дисперсии в производстве медикаментов, аморфных солнечных элементов; бесконтактная плавка без тигля обеспечивает получение высокочистого оптического стекла, шарикоподшипников.

Основные направления развития космического производства материалов:

1). **Получение полупроводниковых материалов для электроники.** В космических условиях обеспечивается возможность получения и изготовления сверхчистых материалов в печах многоцелевого назначения методами химического осаждения из паровой фазы и молекулярно-лучевой эпитаксии. Например, сплав палладия с кремнием используется в качестве узлов электронных блоков [4].

2). **Биотехнология и медико-биологические препараты.** В этом направлении созданы установки для выращивания белковых кристаллов. Это связано с тем, что для искусственного синтеза на Земле некоторых лекарственных препаратов, например, гормонов и фермен-

тов, необходимо провести исследования их структуры. Однако на Земле из-за влияния силы тяжести не всегда можно вырастить кристалл белка, размер которого был бы достаточен для проведения рентгеноструктурного анализа [5]. Под действием силы тяжести кристалл белка либо деформируется, либо в нем возникают нарушения структуры.

Перспективным направлением космического производства является электрофорез, обеспечивающий разделение биологической смеси субклеточных частиц белков различного вида, нуклеиновых кислот для диагностики определенных форм раковых заболеваний, исследования генетической изменчивости, получение биологически активных лекарственных веществ, получение компонентов крови для изучения и прочее [5, 6].

Установка для космического электрофореза не требует больших затрат энергии. Она должна быть снабжена холодильной камерой для хранения исходного материала, до разделения и полученного после разделения. Энергоснабжение должно обеспечиваться специальной установкой с точной регулировкой напряжения и силы тока.

Методы электрофореза и конструкции установки могут быть разными, но во всех случаях должны быть предусмотрены система подачи раствора и биоматериала в рабочую часть, выделение и хранение получаемых веществ, термостатирование, отвод выделяющихся газов и возможность автоматического или полуавтоматического управления процессом.

Наряду с электрофоретическим разделением препаратов из смеси, перспективным является создание установок для выращивания протеинов непосредственно на борту. Важным достижением явилось получение антивирусной вакцины гемоглутинина, очищенного до уровня в несколько десятков раз лучше, чем вакцина, очищенная на Земле. Космическому производству должен предшествовать синтез заготовки из исходных материалов на Земле. Это может быть исходное соединение или смесь компонентов в необходимой пропорции.

3). Получение оптических материалов. Особое значение в настоящее время имеет создание стекол для быстро прогрессирующих систем связи с использованием волоконной оптики, твердотельных лазеров, интегральной оптики для ЭВМ. Использование космической технологии способствует улучшению качества стекол. Подавление тепловой конвекции в определенной степени снижает вероятность спонтанного образования зародышей кристаллизации.

4). **Космическая металлургия, получение сплавов металлов со специальными свойствами.**

В космических условиях обеспечивается возможность изготовления твердых эвтектик с пластинчатой или волокнистой структурами методом направленной кристаллизации для оптики, приборостроения и других областей промышленности. Процесс кристаллизации осуществляется выплавкой материала в печах многоцелевого назначения посредством электронно-лучевого или индукционного нагрева [5]. Так, были получены твердые эвтектики NaCl-NaF с непрерывными волокнами NaF, равномерно и направленно расположенными в свободной от дефектов матрице. Такие эвтектики с довольно высоким коэффициентом пропускания в широкой области спектра могут использоваться в устройствах для передачи изображения. Ряд высокотемпературных эвтектик применяется в авиационных двигателях. Ферромагнитные высококоэрцитивные сплавы с эвтектической структурой, полученные на космическом аппарате, обладают более высокой коэрцитивной силой по сравнению с земными образцами. Так, ферромагнитный сплав Mn-Bi имеет коэрцитивную силу примерно на 60% выше, чем выплавленный в наземных условиях.

5). **Электронно-лучевая сварка в космосе.** Электронно-лучевая сварка нержавеющей стали, титановых и алюминиевых сплавов является одним из наиболее перспективных процессов в космической технологии. С этой целью создано различное оборудование. Так, в СССР была разработана сварочная установка "Вулкан", на которой обеспечивалась качественная сварка стыковых и замковых соединений с отбортовой кромок и без нее.

6). **Оборудование для научных исследований.** Использование космического вакуума в разнообразных экспериментах на борту космического аппарата представляет большой научный и практический интерес для исследования физических свойств поверхности твердого тела, изучения химического состава поверхностей с помощью Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и пр. С этой целью создано различное экспериментальное оборудование. Так, в условиях полета космического аппарата Скайлэб-IV с помощью специальной установки были созданы и изучены плавающие зоны для очистки и выращивания монокристаллов химически активных веществ, таких как вольфрам и кремний. Позднее с помощью плавающих зон были выращены монокристаллы тугоплавких окислов.

Библиографический список

1. **Денисов А.С.** Вакуумные установки для наземных испытаний // Научное приборостроение. 1986. № 6. С. 190–193.
2. **Нусинов М.Д.** Влияние космического вакуума на материалы и устройства научной аппаратуры. М.: Машиностроение. 1937.
3. **Нусинов М.Д.** Имитационные установки. М.: Машиностроение, 1980.
4. **Космическая технология.** М.: Мир, 1980.
5. **Авдеевский В.С.** Космическая индустрия. М.: Машиностроение, 1989.
6. **Barnet M. B.** I commercial assessment of protein crystal growth in microgravity // Space commerce. 1991. P. 93–108.

9. ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

9.1. Вакуумные аэродинамические трубы

Вакуумная аэродинамическая труба – лабораторная установка, предназначенная для испытания различных объектов при проектировании новых летательных аппаратов [1]. Испытания в вакуумной аэродинамической трубе позволяют производить измерения аэродинамических сил и моментов, действующих на модель летательного аппарата, изучать пограничный слой, характер обтекания и проводить другие аэродинамические исследования [1, 2]. Аэродинамическая труба имеет пять основных элементов:

- форкамеру, которая является сосудом, откуда происходит истечение газа через сопло в рабочую часть;
- сопло, которое служит для получения в рабочей части потока с заданными газодинамическими параметрами;
- рабочую часть трубы, где устанавливаются испытываемые модели и производятся необходимые измерения и наблюдения;
- диффузор, назначение которого - наиболее эффективно преобразовать кинетическую энергию потока газа, выходящего из рабочей части, в потенциальную энергию давления;
- агрегат привода, являющийся источником энергии, создающим поток в трубе.

Вакуумные аэродинамические трубы относятся к трубам временного действия, в которых перепад давления создается посредством образования вакуума на выходе из диффузора. Воздух в форкамеру вакуумной трубы засасывается непосредственно из атмосферы, давление в форкамере равно или меньше атмосферного.

Вакуумный насос откачивает воздух из вакуумного ресивера в течение длительного времени до низкого давления. Для запуска трубы открывается быстродействующий клапан. Под действием разности давлений в атмосфере и в вакуумном ресивере создается поток в трубе. Эксперимент будет продолжаться до тех пор, пока в ресивере давление не повысится до некоторого максимального значения, после чего трубный скачок уплотнения войдет в сопло трубы, заданные газодинамические параметры потока в рабочей части будут при этом нарушены. Для прекращения эксперимента, закрывается быстродействующий клапан.

9.2. Вакуумные технологии в авиационной и ракетно-космической технике

В авиационной технике вакуумные технологии широко используются для получения особо чистых материалов и сплавов, упрочнения конструкционных материалов авиационных турбин и двигателей, повышения их коррозионной и износостойкости, увеличения термостойкости.

Создание новых материалов для авиации является предметом целого направления техники: авиационного материаловедения. Так, в последние годы с помощью вакуумных технологий создан целый ряд высокопрочных материалов для авиационной техники.

В результате совместных исследований фирмами Fokker Aircraft B.V. и Stork Veco B.V. разработан новый материал, основанный на микропористом никеле и получивший название перфолин. Этот материал предназначен для использования в звукоизолирующих покрытиях в авиационной промышленности.

В Обнинском НТП "Технология" созданы высокотермостойкие огнеупорные корундомуллитовые материалы, обладающие высокой металлоустойчивостью к жаропрочным никелевым сплавам [3]. Материалы используются для изготовления тиглей для точного литья лопаток газовых ракетных двигателей, производства мерных заготовок жаропрочных сплавов, коробов для обжига стержней.

Установлено, что улучшенные материалы, как суперсплавы, будут оказывать существенное влияние на характеристики современ-

ных двигателей. Внедрение в конструкцию авиационных двигателей "Intermetallic" материалов позволит улучшить характеристики и уменьшить массу двигателей. Для изготовления лопаток фирма Martin Marietta Co предлагает сплав Mar-M200+Hf; фирма Internat. Electric Co для изготовления дисков разработала сплав Inconel 718.

В работе [4] обоснована перспективность использования керамики при изготовлении газовых турбин и поршневых двигателей. При этом значительно повышается их КПД и долговечность.

В авиационной и ракетной промышленности широко используются методы вакуумной плазменно-дуговой и термодиффузионной сварки.

Библиографический список

1. **Паничкин И.А.** Основы газовой динамики и их приложение к расчету сверхзвуковых аэродинамических труб. Киев: Изд-во Киевского университета. 1965.
2. **Jenkins D.M.** The relationship between state and dynamic burst pressures of sheet steel diaphragms. *Gonf. Dyn. Load, lanuf. and Serv.*, Melbourne. 9-11 Febr. 1993.
3. **Кемин Ю.И.** Керамические материалы для авиационной технологии // *Огнеупоры*. 1993. № 10. № 2–4. С. 32.
4. **Beier E.** Keramltwerkstoffe fur Flugzeuge und Eaumfahrzeuge // *Technica (Suisse)*. 1992. Vol. 41. № 26. P. 27–30.

10. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАБОТЫ С РАДИОАКТИВНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

10.1. Вакуумные регенерационные установки

При работе и демонтаже реактора атомных электростанций и других ядерных установок необходимо предотвращение попадания радионуклидов в окружающую среду. Для удержания или торможения радиоактивных веществ фирма Leybold-Heraeus предлагает регенерационную установку, состоящую из двух низкотемпературных ректификационных колонн с полностью автоматическим устройством управления технологическим процессом [1]. Основное назначение установки – выделение радиоактивных криптона и ксенона. При этом инертные газы должны обладать очень высокой концентрацией, либо

должна сохраняться очень высокая степень чистоты азота. Долгое время затухания радиоактивного криптона требует приблизительно 100 лет его хранения.

Представляет интерес процесс регенерации металлов из металлического скрапа различной радиоактивности, обусловленной сорбцией радионуклидов на поверхности металлов. За рубежом для дезактивации поверхностно загрязненного металлического скрапа (стальные конструкции, трубы, клапаны, насосы и прочая арматура, например, реактора атомной электростанции), содержащего тритий или другие летучие или газообразные радионуклиды успешно применяется переплав в вакуумных регенерационных установках. Так, в Германии на фирме Siemelkamp в индукционной печи переплав радиоактивного скрапа осуществляется при пониженном давлении [2]. Для предотвращения выделения в окружающую среду радиоактивных аэрозолей вокруг печи сооружены две секции, снабженные собственными системами газоочистки. Этот метод обеспечивает возврат частиц металлических отходов в производственный цикл.

10.2. Вакуумные радиоизотопные установки

Установки для β - и γ -облучения предназначены для проведения процессов радиационной технологии, при которой получение веществ или облучение изделий осуществляется в результате воздействия ионизирующих излучений, что приводит к изменению химических, биологических и физических свойств. Основным элементом радиоизотопной установки является источник ионизирующего излучения, например источник γ -излучения ^{60}Co и ^{137}Cs , источник β -излучения ^{90}Sr . В качестве таких источников могут использоваться закрытые радионуклидные источники, ускорители заряженных частиц, гамма-носители радиационных контуров при ядерных реакторах и пр.

Так, канадская фирма AECL выпускает промышленную установку, включающую ядерный реактор с источниками γ -излучения для облучения блочных объектов (герметичных или негерметичных емкостей различной формы или объема) [3].

Установки для β -облучения фирмы Leybold-Heraeus (Германия) работают по принципу ускорителей Ван-де-Граафа [1]. Электроны создаются в генераторе постоянного напряжения и переносятся на конденсатор. Накаливаемый катод испускает электроны, которые выходят из лучевого окна в атмосферу и проникают в материал.

Радиоизотопные установки широко применяются для:

- радиационной стимуляции сельскохозяйственных культур в целях повышения урожайности (предпосевное облучение семян), получение новых сортов растений с заранее заданными свойствами – радиационно-химические процессы (РХП);
- радиационной вулканизации каучука (РХП);
- радиационной полимеризации с целью получения новых древесно-полимерных, бетон-, асбест-, туф-полимерных материалов, а также нанесения полимерной пленки на поверхность минеральных удобрений для значительного увеличения срока действия, этих удобрений после внесения их в почву (РХП);
- радиационного модифицирования полиэтиленовых сантехнических изделий для горячего водоснабжения и пр. (РХП);
- радиационной стерилизации (радиационно-биологические процессы) изделий медицинского назначения (шприцов одноразового пользования, перевязочных материалов и т.п.), фармацевтических продуктов (облучение лекарственных препаратов и т.п.), продуктов сельского хозяйства с целью уничтожения вредителей; пищевых продуктов для удлинения срока их хранения;
- изменения структуры (радиационно-физические процессы) кристаллической решетки твердого тела для «сшивания» продуктов электронной и химической промышленности. Так, на отечественной рентгеновской установке модели КРМ-1 в результате γ -облучения фторсодержащих полимеров, обладающих уникальными свойствами могут протекать следующие процессы: частичная кристаллизация, обуславливающая рост интегральной интенсивности на большеугловых рентгенограммах и размеров кристаллов; радиационная деструкция; сшивание цепей, обуславливающее потери деформативности (т.е. повышение хрупкости) материала в целом [4].

Библиографический список

1. **Вакуумная техника.** Leybold-Heraeus-Проспект, 1980.
2. **Шульга Н.А.** Перспективы развития за рубежом регенерации металлов нерадиактивного металлического скрапа методом плавления // Атомная техника за рубежом. 1994. № 6. С.10–17.
3. **Гольдин В.А.** Установки и аппараты радиационной технологии. М.: Энеогоатомиздат, 1985.
4. **Каримов С.И.** Влияние гамма-облучения на структуру и диэлектрические свойства фторсодержащих полимеров. Космическое материаловедение и технология. М.: Наука, 1977.

11. ВАКУУМ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Наиболее широкое применение находит вакуум в приборостроении при создании так называемых электровакуумных приборов, являющихся одним из основных направлений современной электроники.

Электровакуумные приборы – электронные приборы, в которых рабочее пространство освобождено от воздуха и защищено от окружающей атмосферы вакуум-плотной оболочкой (давление остаточных газов в рабочем режиме обычно не превышает 10^{-4} Па). Работа электровакуумных приборов основана на взаимодействии потока электронов, испускаемых катодом, с постоянным и переменным электрическим и магнитным полями. Они служат для различного рода преобразований электромагнитной энергии (генерации, усиления и т.д.).

К электровакуумным приборам относятся:

- электронные лампы для усиления и генерирования электрических колебаний в радиотехнике, радиовещании;
- электровакуумные СВЧ приборы (магнетроны, клистроны, лампы бегущей волны) для использования в устройствах радиолокации, телевидении, например, для передачи телевизионных сигналов по спутниковым линиям, телеуправлении искусственными спутниками Земли и космическими кораблями;
- электронно-лучевые приборы (осциллографы, кинескопы, микроскопы, радиолокационные индикаторы);
- фотоэлектронные приборы (фотоэлектронные умножители, вакуумные фотоэлементы и пр.), применяемые в устройствах автоматики, астрономии, ядерной физики;
- вакуумные индикаторы (цифровые индикаторные лампы, электронный индикатор настройки), в которых электрическая энергия преобразуется в световую;
- рентгеновские трубки, предназначенные для получения рентгеновского излучения, широко применяемые дефектоскопии, рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализа, медицинской диагностики и пр. [1].

Широкое применение в науке, технике и промышленности получили вакуумные аналитические приборы: электронные микроскопы, масс-спектрометры и др. Электронные микроскопы, позволяют с помощью пучков электронов, ускоренных до больших энергий (30–100 кэВ и более) в условиях высокого вакуума получать многократно

(до 10^6 раз) увеличенное изображение объектов [2]. Различают просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ), растровый электронный микроскоп (РЭМ) и смешанный микроскоп (ПРЭМ).

Среди различных типов этих приборов центральное место занимает ПЭМ. В оптической системе типичного ПЭМ с высокой разрешающей способностью создается высокий вакуум (10^{-4} Па). В конструкцию ПЭМ входят: оптическая система, световой микроскоп, тубус со смотровыми окнами, пульт управления, корпус, источник питания линз, источник высокого напряжения, вакуумная система и высоковольтный кабель. В ПЭМ пучок электронов, испускаемых накаленным катодом, формируется электронной пушкой и затем дважды фокусируется конденсорами. В результате на объекте создается электронное «пятно», диаметр которого можно менять в пределах от 1 до 20 мкм. После прохождения сквозь объект наблюдения часть электронов рассеивается и задерживается апертурной диафрагмой. Нерассеянные электроны проходят через отверстие диафрагмы и фокусируются объективом в предметной плоскости промежуточной линзы. Здесь образуется первое увеличенное изображение. Последующие линзы создают многократное изображение. Последняя, проекционная, линза формирует изображение на флюоресцирующем экране, который светится под воздействием электронов. При фотографировании экран убирается и электроны воздействуют на светочувствительный слой фотопластинок, расположенных под экраном. ПЭМ, как правило, используется в качестве универсального прибора многоцелевого назначения. В нем можно наблюдать поверхность объекта, осуществлять электронно-графические исследования структуры тонких пленок и др.

В научных исследованиях наибольшее применение получили РЭМ, с помощью которых можно, например, выполнять рентгеновский структурный анализ, исследовать распределение магнитных и электрических полей по поверхности объекта. Основное достоинство РЭМ, в котором магнитная отклоняющая система разворачивает зонд (электронный луч) по заданной площади на объекте, - высокая информативность, обусловленная возможностью наблюдать изображение, используя сигналы различных детекторов. Для откачки электронных микроскопов используются диффузионные насосы с азотными ловушками, перспективные турбомолекулярные насосы с магнитными опорами ротора.

Масс-спектрометрические анализаторы остаточных газов (МСАОГ) применяются для получения точных сведений о газовых процессах, протекающих в высоковакуумных системах [3, 4]. Анализа-

торами остаточных газов служат масс-спектрометры, как не имеющие собственной откачной системы и состоящие из масс-спектрометрического преобразователя и измерительного блока, так и приборы с собственной системой откачки.

Принцип работы всех масс-спектрометрических преобразователей, устанавливаемых непосредственно на испытуемом высоковакуумном объекте, основан на детектировании ионов остаточного газа, число которых пропорционально его концентрации. В масс-спектрометрических преобразователях молекулы анализируемого газа ионизируются в ионном источнике. Образовавшиеся положительные ионы вытягиваются из камер ионизации, фокусируются в параллельный пучок и направляются в масс-спектрометрический анализатор, где под действием электрического или магнитного полей разделяются в пространстве (или во времени) по характерному для них отношению массового числа M к его заряду e . После разделения ионы с определенным M , на которое настроен масс-спектрометр, попадают на коллектор и создают в его цепи силу тока, пропорциональную парциальному давлению соответствующего газа.

В настоящее время наиболее широко применяются квадрупольные масс-спектрометры и масс-спектрометры с магнитным отклонением. В квадрупольном масс-спектрометре разделение ионов осуществляется в поле высокочастотной квадрупольной линзы, образуемой четырьмя параллельными электродами круглого сечения. Многие фирмы выпускают квадрупольные масс-спектрометры с программаторами, предназначенные для контроля технологических процессов. Так, разработанный совместно фирмами Leybold-Heraeus и Inficon квадрупольный масс-спектрометр модели *IQ-200* используется как для контроля технологических процессов, так и для анализа состава остаточных газов, для исследования продуктов газовой выделенности. Принцип действия масс-спектрометра с магнитным отклонением основан на разделении моноэнергетического пучка ионов в однородном поперечном магнитном поле, масс-спектрометры используются так же как теческатели.

Широкое распространение в науке, технике и промышленности получили вакуумные аналитические приборы для анализа поверхности твердого тела (ПАПТТ). ПАПТТ (спектрометры) предназначены для изучения таких процессов, как адсорбция, катализ, коррозия и окисление металлов, трение и износ, разрушение материалов и пр. Типичный спектрометр для анализа поверхности состоит из вакуумной камеры, которая включает в себя образец, источник возбуждения

эмиссии электронов, источник фотонов, источник рентгеновских лучей, источник ионов, анализатор масс или энергий, детектор.

Кроме этого, данное оборудование оснащают устройствами для скола образца в вакууме с целью получения атомно-чистой поверхности. Как правило, спектрометры снабжены многоступенчатыми средствами откачки с предельным вакуумом 10^{-8} – 10^{-9} Па. Наибольшее распространение получило ПАПТТ на основе методов электронной и ионной спектроскопии.

К методам электронной спектроскопии относятся методы, в которых эмитируемыми частицами являются электроны, а зондирующими – электроны, фотоны и ионы. К методам ионной спектроскопии относятся методы, в которых вторичными частицами являются ионы. К наиболее распространенным методам электронной спектроскопии относятся Оже-электронная спектроскопия, рентгеновская и УФ-фотоэлектронная спектроскопия, спектроскопия энергетических потерь электронов, к методам ионной спектроскопии – вторичная ионная масс-спектрометрия, спектроскопия ионного рассеяния, спектроскопия резерфордовского обратного рассеяния.

Среди серийно выпускаемого ПАПТТ в нашей стране можно отметить Оже-электронный спектрометр модели 09ИОС-2 и вторичный ионный масс-спектрометр Полюс-4. Конструктивно Оже-электронный спектрометр состоит из аналитической вакуумной камеры с размещенным в ней анализатором энергий Оже-электронов, источниками электронов и ионов и манипулятором с образцом, а также предварительной камеры для смены и обработки образцов. Обе камеры имеют независимую откачку и позволяют получать предельный вакуум 10^{-8} и 10^{-5} Па. Вторичный ионный масс-спектрометр Полюс-4 предназначен для экспрессного послойного анализа химического состава твердого тела и определения профилей распределения примесей по глубине стравливаемого слоя с разрешением до $3 \cdot 10^{-9}$ м. В Полюсе-4 применен монополярный масс-анализатор квадрупольного типа, благодаря использованию которого можно одновременно проводить сравнительный анализ: образец-эталон в идентичных условиях. В спектрометре имеются два ионных газоразрядных источника типа Пеннинга, в которых в качестве рабочих газов используются Ag, H_2 , O_2 . Аналитическая камера Полюса-4 откачивается механическим вакуумным насосом и ТМН. Рабочий вакуум составляет 10^{-4} – 10^{-5} Па.

Библиографический список

1. **Шишкин Г.Г.** Электронные приборы. М.: Энергия, 1989.
2. **Шерстнев Л.Г.** Электронная оптика и электронно-лучевые приборы. М.: Энергия, 1971.
3. **Зайдель А.Н.** Техника и практика спектроскопии. М.: Энергия, 1976.
4. **Аверина А.П.** Вакуумные аналитические приборы и оборудование. М.: Машиностроение, 1986.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Глава 1

1. На какие периоды можно разбить историю вакуумной техники в России?
2. Сформулируйте основные достижения в области создания вакуумных насосов в России.

Глава 2

1. Приведите примеры использования вакуумных технологий в металлургии.
2. С какой целью используется вакуумная плавка металлов и сплавов?
3. Охарактеризуйте процесс дистилляции металлов и сплавов в вакууме.

Глава 3

1. Что такое вакуумная ректификация?
2. Где применяется процесс выпаривания в вакууме?

Глава 4

1. Сформулируйте области применений вакуумных технологий в электротехнике.
2. Какое вакуумное оборудование используется в электротермической технике?
3. Что такое вакуумные выключатели?

Глава 5

1. Какие вакуумные технологии применяются в энергетике?
2. Что такое полупроводниковая солнечная энергетика?

Глава 6

1. Какие вакуумные установки используются в угледобывающей и горнорудной промышленности?
2. Назовите основные типы вакуум-фильтров.

Глава 7

1. Из каких основных элементов состоят вакуумные системы электрофизических установок?
2. Назовите средства откачки электрофизических установок.
3. Какие вакуумные технологии применяются в электрофизическом аппаратостроении?

Глава 8

1. Назовите основные типы установок для имитации условий космического пространства.
2. Сформулируйте основные направления развития космического производства материалов.

Глава 9

1. Какие вакуумные технологии применяются в авиационной и ракетно-космической технике?
2. Из каких основных элементов состоит аэродинамическая труба?

Глава 10

1. Что такое вакуумные регенерационные установки?
2. Перечислите области применения радиоизотопных установок.

Глава 11

1. Какие электровакуумные приборы вы знаете?
2. В каких аналитических приборах используются вакуумные технологии?

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ОТКАЧКИ В РОССИИ.....	3
2. ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.....	14
2.1. Вакуумная внепечная обработка.....	15
2.2. Вакуумные электропечи.....	17
2.3. Дистилляция в вакууме.....	21
2.4. Сварка и пайка в вакууме.....	21
2.5. Спекание в вакууме.....	24
3. ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ХИМИИ, НЕФТЕХИМИИ И ХИМИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ.....	26
3.1. Вакуумная и молекулярная дистилляция (перегонка).....	26
3.2. Вакуумная ректификация.....	28
3.3. Тепловая вакуумная и сублимационная сушка.....	29
3.4. Фильтрация в вакууме.....	30
3.5. Выпаривание в вакууме.....	31
3.6. Кристаллизация в вакууме.....	32
4. ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ.....	33
4.1. Коммутационная техника.....	34
4.2. Вакуумная технология и оборудование в процессах создания высоковольтной изоляции.....	36
4.3. Электротермическое оборудование.....	41
5. ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА В ЭНЕРГЕТИКЕ.....	44
6. ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА В УГЛЕДОБЫВАЮЩЕЙ И ГОРНОРУДНОЙ РОМЫШЛЕННОСТИ.....	49
7. ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	55
7.1. Вакуумные системы ускорителей и ускорительно- накопительных комплексов.....	56
7.2. Вакуумные системы термоядерных установок.....	57
7.3. Средства откачки электрофизических установок.....	57
7.4. Вакуумные технологии электрофизического аппаратостроения.....	59
7.5. Оборудование для исследования физики плазмы.....	62
8. ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИМИТАЦИИ УСЛОВИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА.....	64
8.1. Вакуумные системы установок.....	64
8.2. Космическая технология.....	67
9. ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ.....	70

9.1. Вакуумные аэродинамические трубы.....	70
9.2. Вакуумные технологии в авиационной и ракетно- космической технике.....	71
10. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАБОТЫ С РДИОАКТИВНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ.....	73
10.1. Вакуумные регенерационные установки.....	73
10.2. Вакуумные радиоизотопные установки.....	73
11. ВАКУУМ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ.....	75
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	80

Учебное пособие

КЕМЕНОВ Владимир Николаевич
НЕСТЕРОВ Сергей Борисович

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

Учебное пособие по курсам
«КРИОВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА»
«РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ»

для студентов ИТТФ, ЭТФ МЭИ (ТУ) и МИЭМ (ТУ)

Редактор издательства О.М. Горина
ЛР № 020528 от 05.06.97г.

Темплан издания МЭИ 2002 г. (I), учебн.	Подписано к печати 28.05.02
Печать офсетная	Формат 60 x 84/16
Тираж 100 экз.	Изд. № 38
	Заказ
	Цена
	Физ. печ. л.5,25

Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14
Отпечатано в типографии ЦНИИ «Электроника», 117415, Москва, просп. Вернадского, д.39