

Промышленные центробежные компрессоры. История развития, типовые конструкции и перспективы

И.Г. Хисамеев (ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнепп»),

В.А. Максимов (Казанский государственный технологический университет)

Кратко изложенная история более чем столетнего развития производства центробежных компрессоров. Большая часть статьи посвящена вкладу в данное направление ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» и ОАО «Казанькомпрессормаш». Приведены примеры ряда технических решений, их достоинства и недостатки. Отмечен существенный вклад В.Б. Шнеппа в данную область науки и техники.

Ключевые слова: центробежные компрессоры, проектирование и производство, история развития.

Industrial centrifugal compressors. Summary on development, typical designs and perspectives
I.G. Khisameev, V.A. Maximov

There is a brief summary of more than one hundred years of development of centrifugal compressor manufacturing, in the Article. The better part of the Article is devoted to contribution of CJSC «NII turbocompressor named after V.B. Shnepp» and OJSC «Kazan'compressormash». There are samples of several technical solutions, their advantages and disadvantages. Significant contribution of V.B. Shnepp to this scientific and technical sphere is stressed up.

Key words: centrifugal compressor, design and manufacturing, brief summary

Машины, в которых перемещение жидкости происходит в поле центробежных сил, были изобретены еще в период средневековья, но не получили распространения.

Теоретические основы проектирования турбомашин заложены трудами Леонарда Эйлера (1707 – 1783 гг.) и Даниила Бернулли (1700 – 1783 гг.), которые были членами Российской академии наук. Уравнение Эйлера для теоретического расчета (1754 г.) послужило фундаментом, на базе которого строились дальнейшие исследования в области турбомашин.

В России работоспособный центробежный вентилятор был внедрен в промышленность в 1832 г. горным инженером генерал-лейтенантом Александром Александровичем Саблуковым (1783 – 1857 гг.). Этот вентилятор использовали на Чагирском руднике, на кожевенных и сахарных заводах, а также в прачечных. В 1838 г. А.А. Саблуков построил центробежный насос. Машины его конструкции очень близки к современным.

Дальнейшее развитие центробежных машин тормозилось из-за отсутствия быстроходных двигателей. Поэтому изобретение электродвигателя в конце XIX века послужило мощным толчком для развития турбомашин.

Первая книга на русском языке под названием «Воздуховодные машины» была опубликована в 1899 г. заслуженным профессором П.М. Мухачевым.

Первый промышленный центробежный компрессор был разработан французским профессором Огюстом Рато в 1900 г. Он же основал фирму «Рато» (Rateau, Франция). В 1906 г. компрессор был пущен в эксплуатацию в установке для подачи воздуха в доменные печи. Компрессор с внутренним охлаждением имел давление

нагнетания 0,8 МПа, производительность 53,3 м³/мин, частоту вращения ротора 5 000 об/мин. Машина была выполнена в двухлинейном исполнении с двумя корпусами сжатия в каждом ряду и с приводом каждой линии от паровой турбины.

После 1906 г. выпуск центробежных компрессоров был организован на многих заводах Европы и Америки. Например, именно с этого времени начинается история разработки турбокомпрессоров на известной фирме «Броун-Бовери» (Brown-Boveri Co. Ltd, Швейцария), а по лицензии фирмы «Рато» центробежные компрессоры начали выпускать заводы фирмы «Шкода» (Чехия). С 1916 г. изготовление компрессоров собственных конструкций было организовано на заводах концерна «ЧКД-Прага».

Ориентировочно до 1910 г. центробежные компрессоры выпускали относительно небольшой производительности (50...200 м³/мин). Начиная с 1910 г., стали изготавливать компрессоры производительностью более 200 м³/мин, которая далее возросла до 2 500 м³/мин. Машины отличались большими радиальными размерами и имели внутреннее охлаждение (рис. 1) [1]. С 1909 г. начинают комбинировать внутреннее охлаждение с внешним в промежуточных охладителях газа.

С развитием химической промышленности, примерно с 1930 г. центробежные компрессоры начали использовать для сжатия самых различных газов и паров. Были изготовлены первые центробежные компрессоры для холодильных установок холодопроизводительностью до 9 300 кВт [2].

До 1917 г. центробежные компрессоры (за исключением вентиляторов) в России не изготавливали. Осво-

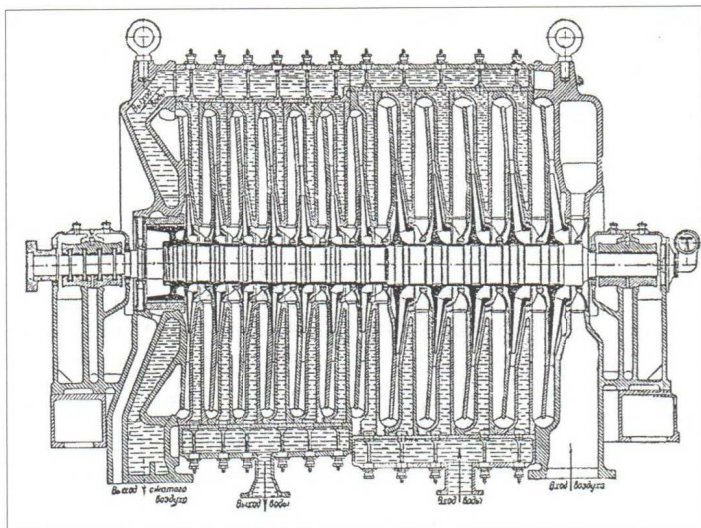


Рис. 1. Центробежный компрессор фирмы «Адамсон» (Англия) с внутренним охлаждением

ение этих машин было начато Ленинградским металлическим заводом. Начиная с 1933 г., основной базой по строительству центробежных компрессоров становится Невский машиностроительный завод им. Ленина (НЗЛ) в Ленинграде. Именно в этом году была изготовлена первая крупная доменная воздуходувка производительностью 3 100 м³/мин [3].

В июне 1937 г. было закончено изготовление первого отечественного промышленного центробежного компрессора (рис. 2) [4]. Компрессор имел следующие параметры: производительность, отнесенная к 0°С и 760 мм.рт.ст., – 270 м³/мин, давление нагнетания – 0,38 МПа и частота вращения ротора – 6 000 оборотов в мин. Он был предназначен для подачи обогащенного

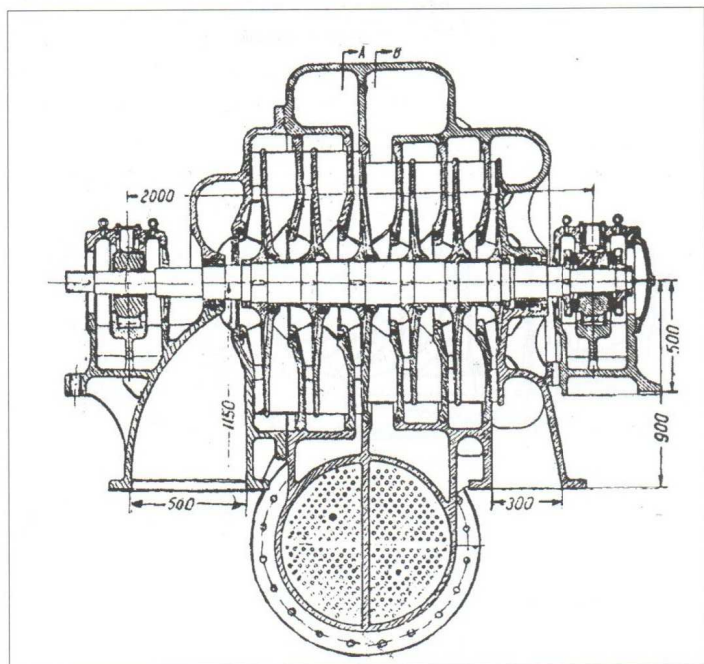


Рис. 2. Первый отечественный промышленный центробежный компрессор производительностью 270 м³/мин

кислородом воздуха в первую опытную доменную установку. Компрессор был шестиступенчатым с одним промежуточным охлаждением, причем корпус холодильника был отлит заодно с корпусом компрессора и расположен горизонтально под машиной. Приводом компрессора (через мультипликатор) был синхронный электродвигатель мощностью 1 500 кВт и частотой вращения 1 500 об/мин.

До войны (1941–1945 гг.) на НЗЛ было спроектировано и изготовлено 20 типов машин, в основном предназначенных для черной и цветной металлургии. После войны освоено свыше 120 разнообразных компрессоров со следующими параметрами: производительность – 100...12 000 м³/мин; отношение давлений – 1,1...28; давление всасывания – до 4,5 МПа. Потребляемая мощность этих машин равнялась 200...22 000 кВт при частоте вращения роторов 1500...22 000 об/мин [3].

В СССР основными заводами, изготавливающими центробежные нагнетатели (газодувки) и компрессоры, были НЗЛ им. Ленина (Ленинград), завод «Энергомаш» (г. Хабаровск), Казанский компрессорный завод (ККЗ, г. Казань), «Узбекхиммаш» (г. Чирчик) и СМНПО им.М.В. Фрунзе (г. Сумы, Украина).

Казанский компрессорный завод (ныне ОАО «Казань-компрессормаш») к освоению выпуска центробежных компрессоров приступил в 1953 г. За базовую была принята конструкция компрессора ТК-8 (рис. 3), разработанная Всесоюзным институтом кислородного машиностроения (ВНИИКИМАШ). Компрессор рассчитан на производительность 135 м³/мин при конечном давлении 0,75 МПа; имеет шесть ступеней, два промежуточных ох-

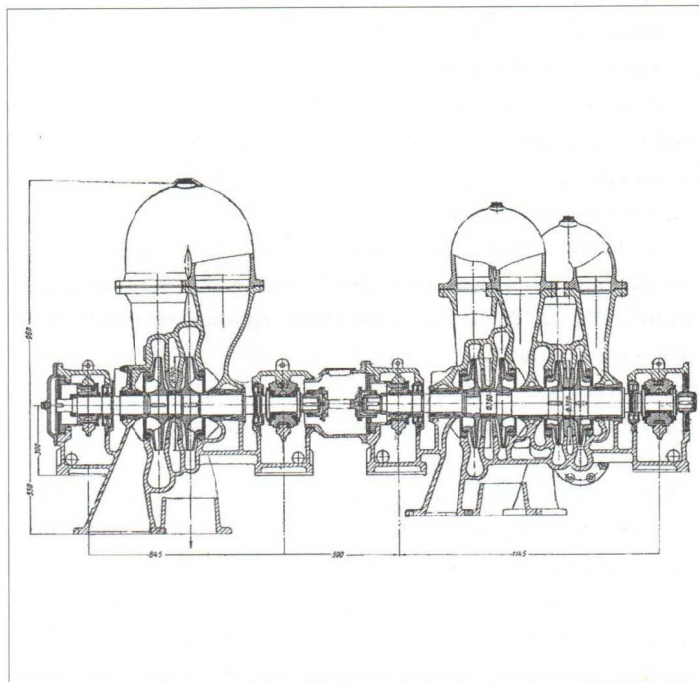


Рис. 3. Компрессор типа ТК-8 конструкции ВНИИКИМАШ

лаждения газа (после второй и четвертой ступеней). Перепуск газа из ступени в ступень происходит через наружные перепускные колена («калачи»). Это дает возможность располагать рабочие колеса по схеме «спина к спине». При этом осевые усилия, действующие на колеса, почти полностью уравниваются. Спиральные отводы, заканчивающиеся прямоосными диффузорами, без направляющих аппаратов во всех ступенях компрессора, являются отличительной особенностью машин конструкции ВНИИКИМАШ. Такую газодинамическую схему компрессора называют «валютной».

В 1955 году был изготовлен и поставлен заказчику первый центробежный компрессор ЦК-100/6,5, предназначенный для подачи воздуха в блоки разделения кислородных установок. Конструктивно компрессор аналогичен компрессору ТК-8 (см. рис. 3), но имеет следующие параметры: производительность 100 м³/мин; конечное давление 0,65 МПа (6,5 кг/см²) при частоте вращения ротора 15200 об/мин; потребляемая мощность 585 кВт.

Впоследствии компрессор был доработан для сжатия азота, а также для других целей по требованию заказчика. Например, в 1961 г. на базе второго корпуса был создан центробежный компрессор ХТК-2,5/3,5 для сжатия хлора (производительность – 2 500 м³/ч, начальное давление – 0,25 МПа, конечное давление – 0,35 МПа). Компрессор предназначен для откачивания хлора из электролизных ванн при производстве соды. Начиная с 1962 г, завод изготовил более 120 таких компрессоров.

Другим примером является компрессор ЦК-135/8 М1, разработанный в 1963 г. отделом главного конструктора Казанского компрессорного завода (ККЗ) на основе документации компрессора ТК-8 (производительность – 135 м³/мин, конечное давление – 0,8 МПа при частоте вращения роторов 13 645 об/мин, потребляемая мощность – 830 кВт). Компрессор выпускали в шести вариантах исполнения в зависимости от типа приводного электродвигателя, частоты вращения роторов и рода сжимаемого газа.

В 1959 г. был освоен двухкорпусный восьмиступенчатый кислородный компрессор КТК-7/14 производительностью 700 м³/ч, конечным давлением 1,4 МПа. Документация была разработана ВНИИКИМАШ на базе компрессора ТК-8. Компрессор предназначался для металлургических предприятий в доменном и мартеновском производствах.

В 1960 г. в Специальном конструкторском бюро по компрессоростроению (ныне ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б.Шнеппа») был спроектирован, в 1961 г. на ККЗ изготовлен и в 1962 г. запущен в промышленную эксплуатацию компрессор ГТК-7/5. Он разработан на базе первого корпуса кислородного компрессора КТК-7/14 производительностью 7 000 м³/ч и конечным давлением

0,5 МПа. Компрессор предназначен для сбора и перекачивания попутного нефтяного газа на газокomppressorных станциях. С 1961 по 1978 г. было изготовлено более 90 таких компрессоров для нефтяных районов страны.

К началу 60-х гг. в связи с интенсивным развитием кислородно-конверторного способа выплавки стали в больших количествах потребовался кислород под давлением 3,5 МПа для продувки крупнотоннажных конверторов. Для решения этой задачи было признано целесообразным модернизировать кислородный компрессор КТК-12,5/28, разработанный и изготовленный ВНИИКИМАШ. Модернизированный компрессор КТК-12,5/35 был спроектирован в 1959 г. в СКБ по компрессоростроению (г. Казань), а в 1961 г. уже изготовлен на ККЗ. При модернизации с целью повышения давления нагнетания с 2,8 до 3,5 МПа была увеличена частота вращения ротора до 13 800 об/мин и изменена проточная часть третьего корпуса (компрессор трехкорпусной с одиннадцатью ступенями). Производительность компрессора – 208 м³/мин [5]. С 1962 по 1995 г. ККЗ изготовил 370 компрессоров КТК-12,5/35.

Как отмечалось, рассмотренные центробежные компрессоры выполнены по газодинамической схеме ВНИИКИМАШа. Аналогичную схему применяла также фирма «Эрликон» (рис. 4). Как видно, спиральные отводы газа от рабочего колеса плавно переходят в несколько прямолинейных конических диффузоров (с прямолинейной осью), что значительно увеличивает радиальные размеры ступени [6]. Преимущество такой

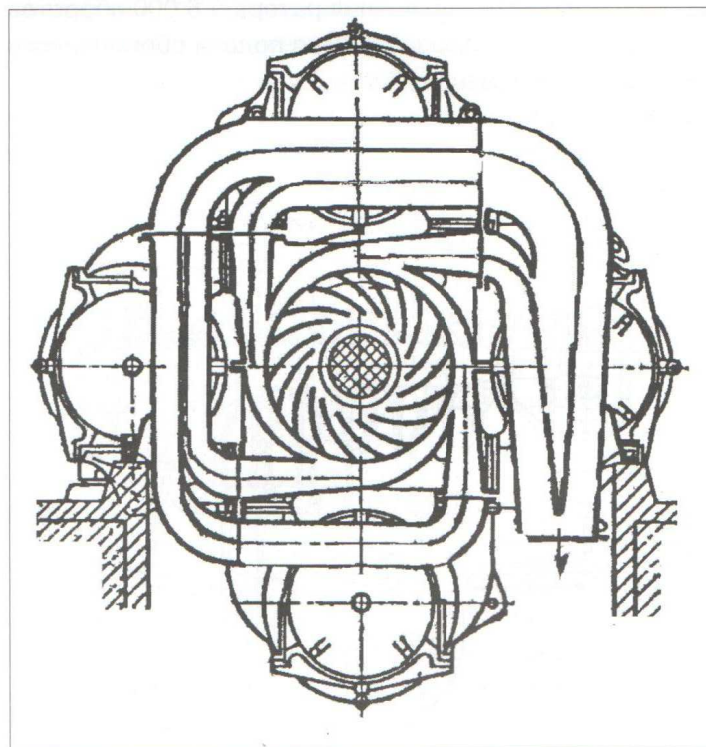


Рис. 4. Ступень центробежного компрессора фирмы «Эрликон» (Швейцария)

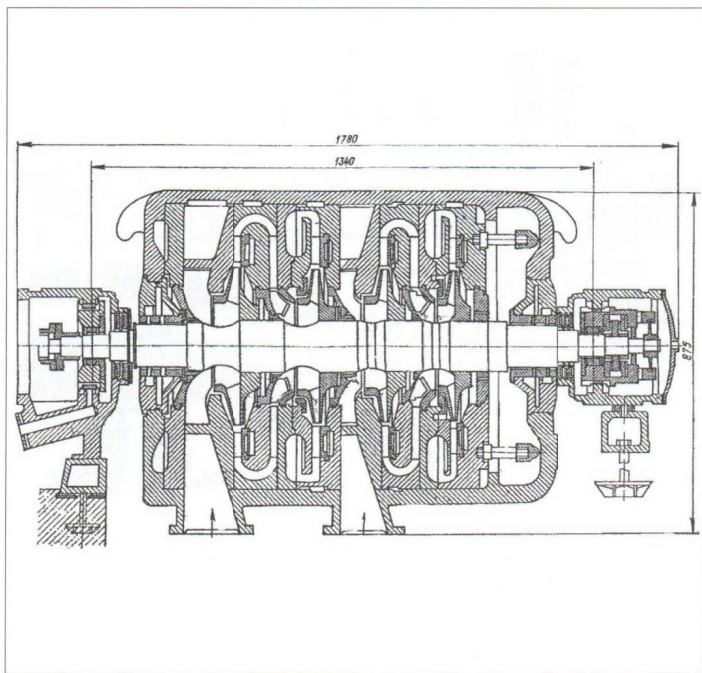


Рис. 5. Конструкция типового корпуса сжатия центробежного компрессора УЦКМ СКБК-ККЗ

схемы заключается в том, что статорная проточная часть, выполненная в отливке корпуса, не требует механической обработки. Однако КПД таких компрессоров не превышает 55%.

Резкий рост химической промышленности и внедрение в металлургическую промышленность кислородного дутья потребовали разработки и освоения нового компрессорного оборудования в кратчайшие сроки. Однако освоение новых компрессоров при индивидуальной системе проектирования требовало четырех – пяти лет, а их качество и технический уровень не всегда соответствовали мировому. Поэтому в 1966 г. в СКБК были начаты работы по созданию компрессорных машин на базе унифицированного ряда (УЦКМ). Ряд охватывает поле параметров по производительности до 450 м³/мин, по конечному давлению до 4,0 МПа. Для этого приняты пять базовых корпусов (№ 1 ... 5) и пять базовых диаметров колес (240; 300; 380; 480 и 600 мм). За основу ряда принят четырехступенчатый корпус с промежуточным охлаждением газа после первых двух ступеней или без него (рис. 5). Унифицированный ряд построен на агрегатном принципе, ему соответствуют ряды унифицированных мультипликаторов, агрегатов смазки, подшипников и уплотнений, соединительных муфт и газоохладителей. Ряды элементов УЦКМ, включая рабочие колеса, построены на принципе геометрического подобия.

Внедрение УЦКМ позволило сократить сроки освоения новых компрессорных установок до двух лет и повысить КПД на 3...5%. Компрессоры пригодны для сжатия практически всех промышленных газов. К на-

стоящему времени в ОАО «Казанькомпрессормаш» освоены более 40 наименований компрессоров, разработанных на основе УЦКМ.

Из них уникальным является кислородный трехкорпусной двенадцатиступенчатый компрессор 543ГЦ1-400/40 производительностью 400 м³/мин, конечным давлением 4,0 МПа для металлургической промышленности. Мощность электропривода составляет 6 300 кВт.

ОАО «Казанькомпрессормаш» не только обеспечивает потребности страны, но и поставляет кислородные компрессоры во многие зарубежные страны. Среди многих зарубежных фирм, производящих центробежные компрессоры, выпуск кислородных ПЦК освоило небольшое число фирм. К ним относятся «Маннесман Демаг» (ФРГ), «Зульцер» (Швейцария), «Хитачи» (Япония) и «ЧКД-Прага» (Чехия).

Фирма «Маннесман Демаг» кислородные компрессоры выпускают с 1951 г. Производительность машин достигает 800 м³/мин, конечное давление – 6,6 МПа.

Следует отметить, что все рассмотренные конструкции компрессоров выполнены с горизонтальным (аксиальным) разъемом корпусов. Это значительно упрощает изготовление, осмотр и ремонт закладных частей компрессора. Однако такую конструкцию корпусов можно использовать до давления газа ~6,0 МПа. При более высоком давлении используют корпуса с вертикальным (радиальным) разъемом.

По-видимому, такая конструкция впервые была использована при создании циркуляционных центробежных компрессоров (ЦЦК). Их используют в технологических линиях по производству аммиака для обеспечения циркуляции в замкнутом контуре непрореагировавшей (не обратившейся в аммиак) части азотовазодородной смеси через колонну синтеза.

Первые ЦЦК были созданы в 1927 г. немецкой фирмой GHH для линий производства аммиака мощностью 100 т/сут. Производительность компрессора составляла 7 м³/мин, начальное давление – 28,0 МПа, конечное – 30,4 МПа, т.е. разность давлений равна 2,4 МПа.

На рис. 6 приведена конструкция ЦЦК завода «ЧКД-Прага» (производительность – 6,6 м³/мин, начальное давление – 29,4 МПа). Центробежный компрессор вместе с электродвигателем размещен в ковном цилиндре, закрытого с торцов съемными толстостенными кованными крышками. Внутри цилиндра поддерживается высокое давление газа, равное давлению всасывания (не менее 30 МПа). Роторы электродвигателя и компрессора установлены на подшипниках качения и соединены упругой муфтой.

Для строившихся укрупненных линий аммиака мощностью 300...600 т/сут, а также для замены большого

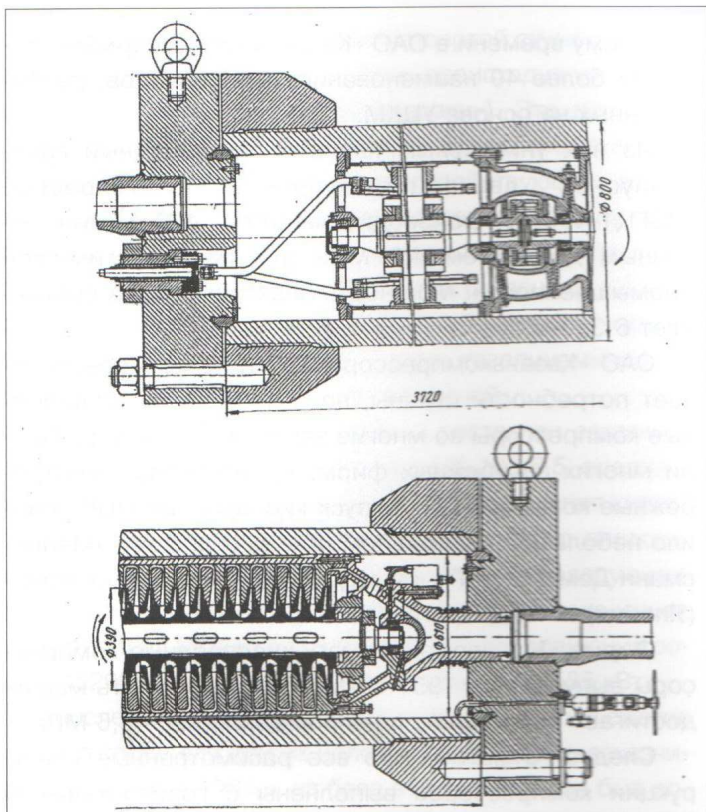


Рис. 6. Центробежный циркуляционный компрессор завода «ЧКД-Прага» (ЧССР)

числа устаревших поршневых компрессоров потребовалось освоение производства ЦЦК с повышенными параметрами – производительность $\sim 10 \text{ м}^3/\text{мин}$ и разность давлений $\sim 3,0 \text{ МПа}$.

В начале 1960 г. СКБК (ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа») спроектировал, а ККЗ освоил производство нового поколения ЦЦК. При этом общая схема ЦЦК была сохранена. Компрессор состоит из 10...14 ступеней, число которых выбирают в зависимости от требуемой разности давлений (между нагнетанием и всасыванием).

Следует отметить, что такие машины «компрессорами» могут быть названы лишь условно, так как степень повышения давления в них (отношение давления нагнетания к давлению всасывания) составляет всего 1,08...1,23. Поэтому их газодинамический расчет производят без учета сжимаемости среды подобно расчету многосекционных центробежных насосов. Первоначально их называли «циркуляционными насосами» или «турбонасосами».

Дальнейшее увеличение мощностей производства аммиака (до 1 360 т/сут), добычи, транспортировки и хранения газа и нефти, а также нефтепереработки потребовали создания центробежных компрессоров с вертикальным разъемом корпусов. К 1970 г. такие фирмы как «Дрессер-Кларк», «Купер-Бессемер», «Ингерсолл-Рэнд» (США), «Нуово-Пиньоне» (Италия) раз-

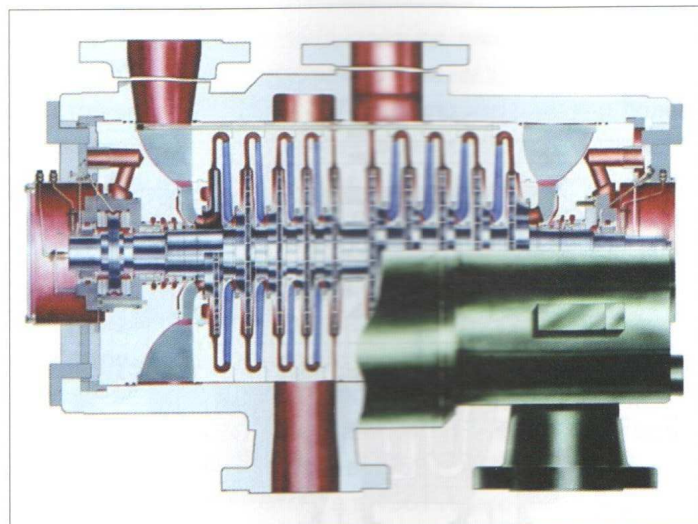


Рис. 7. Корпус сжатия компрессора высокого давления с вертикальным разъемом

работали компрессоры для давления до 45,0 МПа, а затем и до 90,0 МПа.

В зависимости от отношения давлений компрессоры могут состоять из одного, двух или более корпусов сжатия. Каждый корпус (рис. 7) состоит из аэродинамического узла («внутренний корпус»), установленного внутри стального цилиндра. Аэродинамический узел содержит ротор и неподвижную проточную часть, выполненную в диафрагмах с горизонтальным разъемом. С торцов цилиндр закрыт коваными крышками. В первых конструкциях компрессоров крышки к корпусу крепили с помощью шпилек (см. рис. 6). Они получили название «баррель» (в переводе с английского – «бочка»). В настоящее время применяют крепление крышек на специальных замках (см. рис. 7). Такие корпуса сжатия обозначают как «супербаррель».

В России освоение компрессоров с вертикальным разъемом корпусов началось в 1972 г. на базе лицензии, закупленной у фирмы «Дрессер-Кларк» (США) в 1971 г. Всего за период с 1972 по 2006 г.г. СКБК спроектировало, а ОАО «Казанькомпрессормаш» изготовило 125 компрессоров для сжатия различных водородсодержащих, углеводородных и других технологических газов, а также природного и попутного нефтяного газа и их транспортировки. На основе накопленного опыта и разработанной документации в настоящее время к изготовлению компрессоров с вертикальным разъемом корпусов приступили также некоторые предприятия России и СНГ (преимущественно центробежные нагнетатели природного газа для газоперекачивающих агрегатов).

Стремление к повышению эффективности, снижению металлоемкости и габаритных размеров многоступенчатых быстроходных компрессоров привело к созданию

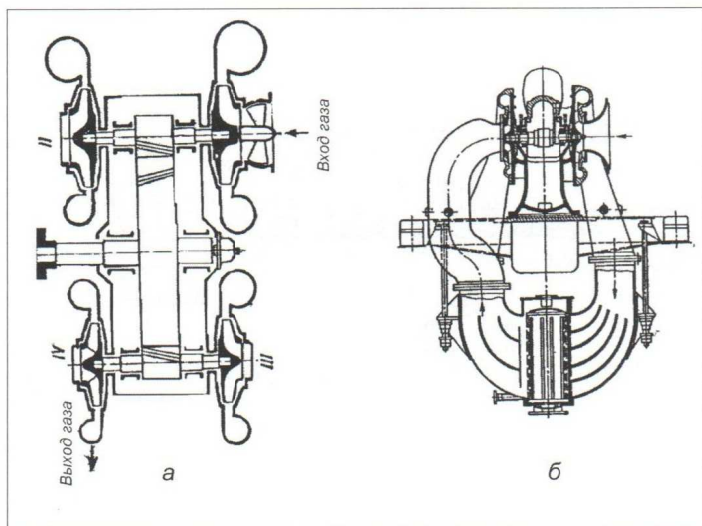


Рис. 8. Конструктивная (а) и компоновочная (б) схемы воздушного компрессора фирмы «Деаг» (ФРГ)

мультипликаторных центробежных компрессоров (МЦК). Первый патент на конструкцию такого компрессора был получен фирмой «Деаг» (ФРГ) в 1948 г. (рис. 8).

Компрессор производительностью $133 \text{ м}^3/\text{мин}$ (отношение давлений – 8) имеет четыре отдельно расположенные ступени с колесами, установленными на концах двух валов-шестерен мультипликатора. Колеса I и II ступеней вращаются с частотой 13 890 об/мин, а колеса III и IV ступеней – 17 930 об/мин. В данной схеме стало возможным выбирать оптимальные окружные скорости колес, применять эффективные ступени с осевым входом и малым втулочным отношением в широком диапазоне производительностей. Второе преимущество – уменьшение осевых усилий вследствие противоположной установки рабочих колес на концах валов.

Воздух компрессорах такого типа охлаждается после каждой ступени в промежуточных холодильниках, что позволяет приблизить процесс сжатия к изотермическому. В современных МЦК производительностью $100...160 \text{ м}^3/\text{мин}$ высокий изотермический КПД ($0,67...0,69$) обеспечивается не только эффективной проточной частью, но системой охлаждения газа. Отношение давлений, равное 9) достигается в четырех, трех или даже в двух ступенях вместо 8...10 ступеней при одновальном исполнении компрессора. Общий недостаток МЦК – увеличение количества концевых уплотнений роторов.

Начиная с 1965 г., когда кончился срок действия патентов фирмы «Деаг», многие ведущие компрессоростроительные фирмы, в основном США, начали производить МЦК собственной конструкции с рядом технических усовершенствований. Например, широко известны модель «Центак» фирмы «Ингерсолл-Рэнд» (США) и «Изопак» фирмы «Дрессер-Кларк» (США).

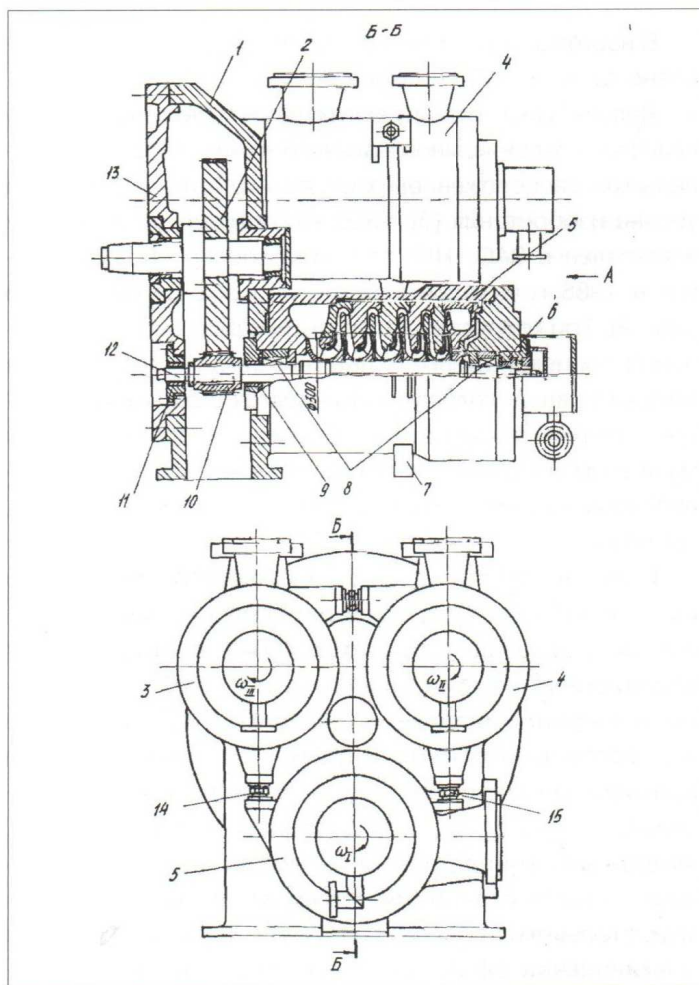


Рис. 9. Мультипликаторный многовальный центробежный компрессор с параллельным расположением корпусов сжатия конструкции ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа»:

1 – корпус мультипликатора; 2 – зубчатое колесо; 3–5 – корпуса сжатия; 6 – сегментный опорно-упорный подшипник; 7 – опора корпуса низкого давления; 8 – концевые уплотнения; 9 – промежуточный цилиндрический подшипник; 10 – шестерня; 11 – регулируемый цилиндрический подшипник; 12 – вал ротора; 13 – крышка мультипликатора; 14, 15 – опоры корпуса сжатия соответственно высокого и среднего давления

Освоение выпуска отечественных МЦК, разрабатываемых ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», началось еще в 1975 г. В настоящее время серийно выпускаются компрессоры для сжатия воздуха, азота, хлора, пропилена и хладагентов холодильных машин. По производительности компрессоры охватывают область $30...1\,000 \text{ м}^3/\text{мин}$, а по давлению – до 5,0 МПа.

МЦК серий ЦКОН (центробежные компрессоры общего назначения) и АЭРОКОМ являются двух-, трех и четырехступенчатыми машинами со встроенным в корпус сжатия газоохладителями, а с выносными охладителями газа выпускаются четырех- и шестиступенчатые компрессоры серии АЭРОКОМ. Выпускаются также одноступенчатые центробежные нагнетатели на базе МЦК.

В настоящее время производство воздушных МЦК освоено также в ОАО «Дальэнергомаш» (г. Хабаровск) [7].

Дальнейшим развитием мультипликаторной схемы является создание многовального компрессора с параллельным расположением корпусов сжатия. Впервые на уровне изобретения [5] такой компрессор разработан и изготовлен в ЗАО «НИИтурбокомпрессор им.В.Б.Шнеппа» в 1986 г. для газлифтного способа добычи нефти (рис. 9). Три корпуса с вертикальным разъемом прикреплены к торцевой стенке мультипликатора, а трехопорные роторы с пятью колесами приводятся в движение непосредственно от зубчатого колеса без промежуточных муфт и имеют разную частоту вращения. Мощность компрессора – 4 МВт, производительность – 500 тыс. м³/сут, давление нагнетания – 11,5 МПа.

Следует отметить, что ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» является пионером в создании газоперекачивающих агрегатов (ГПА) с приводом от авиационных газотурбинных двигателей в блочно-контейнерном исполнении. Первый агрегат ГПА-Ц-6,3, освоенный в 1970...1976 гг., был укомплектован центробежным двухступенчатым нагнетателем, рассчитанным на отношение давлений, равное 1,45; т.е. на полный перепад давлений между линейными компрессорными станциями. Нагнетатель выполнен в литом стальном корпусе с горизонтальным разъемом оригинальной сферической формы (защищен авторским свидетельством на изобретение), который допускает внутреннее давление до 10 МПа. Для привода нагнетателя впервые в отечественной практике был применен двухроторный газотурбинный двигатель НК-12СТ авиационного типа, конвертированный для работы на газообразном топливе [5]. Потребляемая мощность агрегата – 6,3 МВт.

Серийный выпуск ГПА-Ц-6,3 был организован на новом Сумском заводе тяжелого компрессоростроения (СЗТК). По техническому проекту ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» СМПО им. М.В.Фрунзе освоило выпуск нагнетателей с вертикальным разъемом корпуса мощностью 6...16 МВт.

Дальнейшим развитием направления ГПА с приводом от газотурбинных двигателей (авиационных и судовых) является создание более совершенного ГПА мощностью 16 МВт.

В 1995 г. ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» разработало рабочую документацию на ГПА-16 «Волга», а в 1996 г. был изготовлен опытный образец нагнетателя. Центробежный нагнетатель спроектирован на конечное давление 7,6 МПа и отношение давлений 1,44, производительность – 400 м³/мин (по условиям всасывания). Он оснащен активными электромагнитными подшипниками (АМП) и торцовыми газостато-

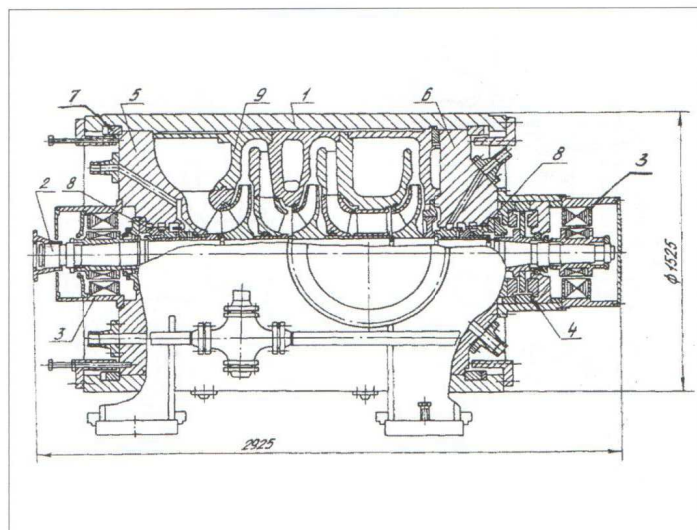


Рис. 10. Общий вид нагнетателя:

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – электромагнитный опорный подшипник; 4 – электромагнитный упорный подшипник; 5, 6 – торцовые крышки; 7 – замок сегментный; 8 – «сухие» газодинамические уплотнения; 9 – проточная часть

динамическими концевыми уплотнениями (ТГСУ) ротора (рис. 10). Это позволяет исключить масляную систему смазки и уплотнений и является новым направлением в конструировании центробежных компрессоров.

Аналогичные технические решения использованы в нагнетателе мощностью 12 МВт, разработанном по заказу НПО «Искра» (г. Пермь) для ГПА-12 «Урал».

Специфическим направлением развития ПЦК является создание детандер-компрессорных турбоагрегатов. В таких агрегатах рабочие колеса турбодетандера и компрессора посажены на одном валу, образуя единый энергозамкнутый ротор. В детандере (расширительной машине) расходуется энергия газа с целью получения холода. Компрессор предназначен для полезного использования работы турбодетандера (турбины). Обычно в компрессор подают газ, прошедший сушку и сепарацию после детандера.

На рис. 11 показана конструкция трубодетандерного агрегата ТКО-75/42, разработанная в ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа». Агрегат предназначен для установки получения гелиевого концентрата с одновременным извлечением этановой фракции из природного газа. При давлении на входе в рабочее колесо турбодетандера 4,2 МПа температура газа на выходе снижается до минус 100°С. Частота вращения ротора составляет 11 000 об/мин. Благодаря установке колес компрессора по схеме «спина к спине» и двухпоточной симметричной центростремительной турбине ротор практически полностью разгружен от осевых сил.

Разработаны также детандер-компрессорные агрегаты, предназначенные для извлечения ценных фрак-

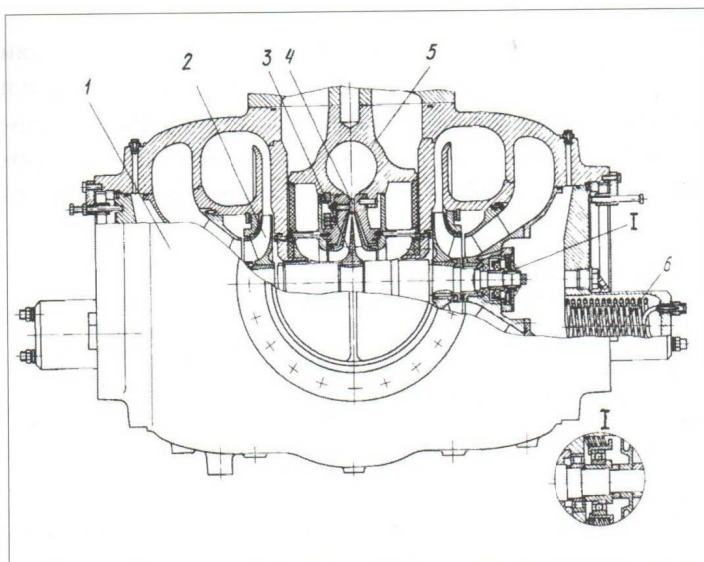


Рис. 11. Детандер-компрессорный турбоагрегат ТКО-75/42: 1 – корпус турбоагрегата; 2 – рабочие колеса компрессора; 3 – рабочее колесо турбодетандера; 4 – сопловой аппарат; 5 – радиальная центробежная турбина (турбодетандер); 6 – змеевик для охлаждения смазочного масла

ций углеводородов из природных и попутных нефтяных газов путем низкотемпературной сепарации. Созданы агрегаты мощностью до 2,5 МВт для газов с высоким содержанием конденсата. Для условий севера турбоагрегаты выпускают в блочно-контейнерном исполнении в полной заводской готовности (БДКА).

ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» совместно с ОАО «Казанькомпрессормаш» освоили выпуск почти всех описанных выше типов ПЦК. По условиям заказчика могут быть разработаны и изготовлены компрессоры любого типоразмера в кратчайшие сроки.

Начиная с 1957 г., создание и организация производства этих ПЦК неразрывно связаны с именем главного конструктора – начальника СКБ по компрессоростроению (с 1985 г. – НИИтурбокомпрессор) Владимира Борисовича Шнеппа. По проблемам компрессоростроения им опубликовано более 150 статей и монографий, оформлено 21 авторское свидетельство и патенты на изобретения. Основные труды опубликованы в книге [8], посвященной 80-летию со дня его рождения. Поэтому здесь остановимся лишь на некоторых моментах его научного творчества.

Первая весьма серьезная проблема возникла при освоении кислородных компрессоров КТК-12,5: из 30 выпущенных, начиная с 1963 г., компрессоров к октябрю 1966 г. было зарегистрировано 12 случаев загорания машин. В.Б. Шнепп лично обследовал все случаи загорания на объектах, провел расчетно-теоретические исследования, в результате которых были разработаны рекомендации по модернизации компрессоров. К настоящему времени выпущено более 600 машин для сжатия кислорода типа КТК-12,5/35, КТК-7/14

и 543ГЦ1-400/40, которые успешно работают в промышленности.

При доводке циркуляционных центробежных компрессоров для синтеза аммиака и метанола при высоких давлениях (30,4...50,7 МПа) на первом же этапе был выявлен недостаточный ресурс работы упорного подшипника – через 150...800 ч работы они выходили из строя. Непосредственные измерения показали, что осевые силы, действующие на ротор, значительно превышают расчетные. Более того, при различных режимах работы компрессора они изменяют и направление действия.

Были проведены обширные экспериментальные исследования, в результате которых разработана уточненная методика расчета осевых сил, а также саморегулируемое разгрузочное устройство. Более 700 таких компрессоров было поставлено на предприятия по производству аммиака и минеральных удобрений. Накопленный опыт был положен в основу кандидатской диссертации В.Б. Шнеппа «Разработка и исследование циркуляционных центробежных компрессоров с саморегулируемым разгрузочным устройством», которая была успешно защищена в 1967 г.

За создание впервые в стране принципиально новых блочно-контейнерных газоперекачивающих агрегатов ГПА-Ц-6,3 с приводом от авиадвигателя мощностью 6,3 МВт и внедрение их в газовой промышленности СССР в 1980 г. В.Б. Шнеппу присуждена Государственная премия СССР. В настоящее время более 400 таких агрегатов успешно работают на газовых магистралях России.

С целью ускорения освоения центробежных машин высокого давления для нужд многих отраслей страны, в 1972 г. была приобретена лицензия у фирмы «Дрессер Кларк» (США). СКБК стало одним из основных разработчиков центробежных компрессоров с вертикальным разъемом корпуса, нашедших широкое применение в компрессорных установках для риформинга бензина и гидроочистки дизельных топлив в нефтеперерабатывающей промышленности, газлифтной добычи нефти, крупнотоннажного производства аммиака мощностью 1360 т/сут. Обладая большими практическими знаниями технологии производства машин, В.Б. Шнепп живо интересовался и повседневно поддерживал техническое переоснащение Казанского компрессорного завода. Были построены современная испытательная станция, впоследствии ставшая крупнейшей в Европе; сборочный корпус компрессоров высокого давления; закуплены и пущены в эксплуатацию высокоточные станки типа «Морандо»; стенд с вакуумной камерой фирмы «Шенк» (Германия) для динамической балансировки роторов на рабочей частоте вращения.

В.Б. Шнепп стоял у истоков создания мультипликаторных многовалвных центробежных компрессоров общего назначения. Сотни компактных в полной заводской готовности моноблочных машин типа 32ВЦ-100/9 и 43ВЦ-160/9 поставлены различным заказчикам.

При В.Б. Шнеппе разработана и внедрена стройная система конструирования машин на базе агрегатирования, унификации и стандартизации, расчетно-исследовательского сопровождения на базе постоянно совершенствуемой вычислительной техники.

Благодаря личному участию В.Б. Шнеппа в СКБК был разработан ряд научных направлений конструирования новых компрессорных машин и их элементов. Созданы экспериментальные стенды для исследований газовой динамики, подшипников и уплотнений, прочности и динамики рабочих колес ПЦК, осевых сил и рабочих процессов проточных частей. По совокупности научных работ в 1984 г. ему была присуждена ученая степень доктора технических наук.

В.Б. Шнепп большое внимание уделял также педагогической деятельности. Им подготовлены и изданы

учебные пособия, созданы лабораторные установки по исследованию динамики роторов, опирающихся на различные типы подшипников и демпферы колебаний. В 1986 г. ему присвоено ученое звание профессора по кафедре «Компрессорные машины и установки» КГТУ.

Список литературы

1. Кертон В. Турбовоздуховодки и турбокомпрессоры. М., Л.: Госэнергоиздат, 1933.
2. Мисарек Д. Турбокомпрессоры. М.: Машиностроение, 1968.
3. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины. Л.: Машиностроение, 1981.
4. Жербин С.М., Рис В.Ф., М.К. Четыркин. Первый советский турбокомпрессор//Советское котлотурбостроение. 1938. №7.
5. Шнепп В.Б. Конструкция и расчет центробежных компрессорных машин. М.: Машиностроение, 1995.
6. Селезнев К.П. и др. Теория и расчет турбокомпрессоров. Л.: Машиностроение, 1986.
7. Кучеренко В.В., Кондратюк В.В. ОАО «Дальэнергомаш»: освоение производства новых типов компрессорных машин//Компрессорная техника и пневматика. 2004. №5.
8. Владимир Борисович Шнепп. Таким мы его помним. Избранные труды. Казань: ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», 2004.



expo
Coating
INDUSTRIAL TECHNOLOGIES
EXHIBITIONS

7-я Международная
выставка и конференция

**ПОКРЫТИЯ
И ОБРАБОТКА
ПОВЕРХНОСТИ**

17-19 марта 2010

Москва, СК «Олимпийский»

Организаторы:



primexpo



ITE GROUP PLC



ufi

Тел.: +7 (812) 380 6017

+7 (812) 380 6000

Факс: +7 (812) 380 6001

E-mail: coating@primexpo.ru

Web: www.expocoating.ru

При участии:



РХТУ им. Д.И. Менделеева

Российское химическое общество им. Д.И. Менделеева

Московское химическое общество им. Д.И. Менделеева

www.expocoating.ru