



РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ СОЗДАНИЯ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН С ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ КОМПРЕССОРАМИ



Д-р техн. наук **И.Я.СУХОМЛИНОВ** **Д.Л.СЛАВУЦКИЙ** Канд. техн. наук **М.В.ГОЛОВИН**
Отдел турбокомпрессорных машин

Разработка научно-технической базы создания холодильных машин с холодильными центробежными компрессорами была начата ВНИИхолодмашем совместно с ОАО «Казанькомпрессормаш» с середины 70-х годов при содействии НИИТК им. В.Б.Шнеппа.

Первый этап был завершен и успешно реализован уже к 1986 г. при подготовке к выпуску второго поколения холодильных машин типа ТХМВ.

Научно-техническая база того периода представляла собой сочетание математического обеспечения проектирования холодильных машин с центробежными компрессорами и производства, подготовленного с учетом широкой унификации основных компонентов холодильных машин.

Методы расчета таких машин были основаны на математическом и физическом моделировании процессов, происходящих в цикле холодильной машины, и реальных свойств хладагентов и выполнялись с применением вычислительных машин типа ЕС.

Внедрение в дальнейшем персональных компьютеров в инженерную практику, запрет на применение озоноразрушающих хладагентов, переход к рыночной экономике и появление конкуренции существенно изменили понятие о рациональной организации работ. Появилась необходимость в проведении комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по совершенствованию научно-технической базы, которые включали дальнейшее развитие методов расчета, создание систем автоматизированного проектирования (САПР), расширение областей применения холодильных машин с центробежными компрессорами, а также возможностей производства.

Развитие методов расчета осуществлялось в следующих направлениях:

- перевод программного обеспечения на персональный компьютер;
- подготовка программного обеспечения расчета новых термодинамических циклов;
- создание программного обеспечения для более широкой номенклатуры используемых хладагентов (включая смеси);
- разработка ускоренных методов расчета, в том числе свойств хладагентов и смесей;
- совершенствование математических моделей холодильных центробежных компрессоров (расчет многоступенчатых компрессоров и получение их характеристик при работе на нерасчетных режимах);
- расширение используемой в расчетах базы экспериментальных данных по характеристикам ступеней и двухступенчатых компрессоров.

Остановимся на основных результатах работ по развитию методов расчета.

Наряду с модернизацией программного обеспечения расче-

та циклов двукратного дросселирования разработаны методики и программы расчета циклов с числом изотерм более двух.

Созданы методики и программный комплекс для определения параметров кондиционера с холодильным центробежным компрессором, работающим в цикле двукратного или однократного дросселирования с различными вариантами охлаждения встроенного высокочастотного электродвигателя (жидким или парообразным хладагентом на уровне давления всасывания в первую или вторую ступени компрессора).

Предложена методика расчета характеристик холодильных машин с центробежными компрессорами при работе на нерасчетных режимах (при регулировании холодопроизводительности).

Особое внимание было уделено созданию ускоренных методов расчета. Например, с помощью разработанной программы «Цикл» можно практически мгновенно получать по заданным параметрам цикла холодильной машины требуемые газодинамические, геометрические и режимные параметры ступеней компрессора. Реализация ускоренного метода расчета термодинамических свойств хладагентов сократила время расчета на персональном компьютере характеристик четырехступенчатого компрессора, работающего в цикле двукратного дросселирования, в 10–15 раз.

В настоящее время программное обеспечение включает определение свойств 55 хладагентов, в том числе углеводородов метанового ряда и смесей.

Создание ускоренных методов расчета позволило разработать методику и программу расчета характеристик холодильных машин с многоступенчатыми (до шести ступеней) центробежными компрессорами. Основные сложности, возникающие при решении подобных задач, связаны с большой продолжительностью счета из-за многократных приближений, требующих высокого быстродействия персонального компьютера.

Расширение базы данных включало исследования в двух направлениях: создание расчетно-теоретических методов решения прямой и обратной задач проектирования применительно к ступени холодильного центробежного компрессора; экспериментальная отработка модельных высокорасходных (коэффициент расхода Φ до 0,18) и малорасходных (Φ до 0,015) ступеней с получением их регулировочных характеристик при различных методах регулирования.

Совместно с кафедрой компрессоростроения СПбГТУ при использовании экспериментальных данных кафедры холодильных машин СПбГУНиПТ разработана математическая модель ступени холодильного центробежного компрессора. Идентификация математической модели выполнена по характеристикам свыше 170 вариантов ступеней. Модель обеспечивает хорошую сходимость в области оптимальных режимов работы и рекомендована к применению.

Отработка модельных ступеней включала также исследование методов унификации ступеней и выбор оптимального. Проведено исследование двух методов унификации высокорасходных ступеней с пространственными рабочими колесами, имеющими одинаковый закон профилирования лопаток: при постоянном угле установки лопаток диффузора и переменной ширине колеса; при переменных значениях обоих указанных параметров.

Параметры унифицированных ступеней, используемые сегодня при разработке новых холодильных центробежных компрессоров, показаны на рис. 1. Как видно из рис. 1, диапазон расходных характеристик значительно расширен как в область больших, так и в область малых коэффициентов расхода, определяющих производительность.

Создание базы данных по ступеням и программного комп-

лекса для получения характеристик холодильных центробежных компрессоров и холодильных машин на нерасчетных режимах работы позволило перейти к формированию банка данных, содержащего характеристики (в том числе регулировочные) двухступенчатых секций и компрессоров. В настоящее время банк регулировочных характеристик охватывает 48 вариантов ступеней и 156 вариантов компрессоров со стандартными проточными частями.

Выполненный комплекс исследований обеспечил также возможность сопоставления различных методов регулирования холодильных машин с центробежными компрессорами.

Результаты исследований эффективности регулирования холодопроизводительности поворотом лопаток входного регулирующего аппарата, поворотом лопаток диффузора и изменением частоты вращения ротора компрессора (рис. 2) свидетельствуют о том, что при снижении холодопроизводительности (в случае постоянной температуры охлаждающей среды, подаваемой на конденсатор) наиболее эффективен комбинированный метод регулирования изменением частоты вращения ротора и угла установки лопаток диффузора.

Наличие банка данных и программного комплекса значительно сокращает время получения регулировочных характеристик холодильного центробежного компрессора и холодильной машины, позволяя решать задачи в реальном масштабе времени, т. е. в простейшем случае переговоров с заказчиком.

Самостоятельное значение имеют работы по созданию САПР холодильных машин с центробежными компрессорами, для проведения которых потребовалось переоснащение материальной базы более современными персональными компьютерами, а также специальное программное обеспечение, необходимое для решения задач, связанных с классификацией, хранением, составлением, поиском и просмотром конструкторской документации, включающей чертежи, текст и спецификацию. Современное оснащение САПР сокращает сроки разработки технической документации на новые холодильные машины до 1–1,5 мес.

Развитие научно-технической базы создания холодильных машин с центробежными компрессорами позволило выполнить на современном уровне ряд работ.

По заданию РАО «Газпром» осуществлены доводка и пуск турбоагрегатов ТП5-16/1 на станции охлаждения газа (СОГ) Ямбургской компрессорной станции, а также модернизация СОГ-6 Пуровской компрессорной станции.

В связи с изменением условий работы СОГ на Ямбургской компрессорной станции (в первую очередь по нагрузкам и температурам охлаждения газа) был проведен комплекс расчетных исследований по выбору оптимального варианта доукомплектации станций теплообменными аппаратами и турбоагрегата-

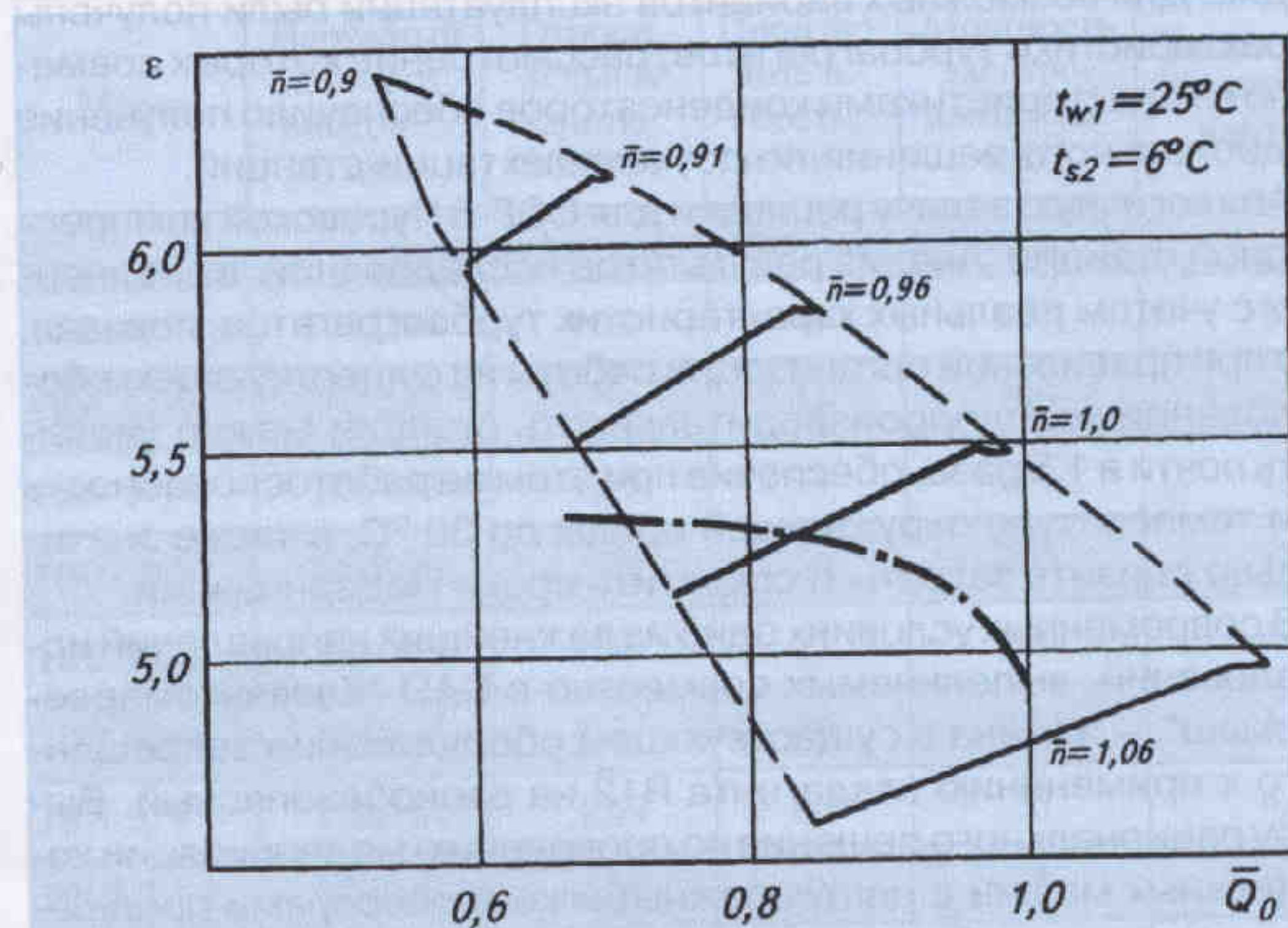


Рис. 2. Сравнение методов регулирования параметров двухступенчатого холодильного центробежного компрессора в составе холодильной машины:

$\bar{Q}_0$ — относительная холодопроизводительность (по отношению к номинальной); ϵ — холодильный коэффициент; $\bar{n}$ — относительная частота вращения ротора (по отношению к номинальной); t_{w1} — температура охлаждающей среды на входе в конденсатор; t_{s2} — температура хладагента на выходе из испарителя;

— — регулирование поворотом лопаток диффузора при постоянной частоте вращения ротора; — — — — регулирование с помощью входного регулирующего аппарата (ВРА); — — — — граница диапазона регулирования

ми. СОГ включает несколько турбоагрегатов (с приводом от газотурбинных двигателей НК12-СТ), работающих на общий коллектор. В связи с использованием воздушного охлаждения конденсатора режим работы СОГ определяется температурой окружающей среды, которая претерпевает значительные изменения в процессе эксплуатации. Задачу по выбору в этих условиях оптимального варианта доукомплектации станции решали с применением созданных программных комплексов и ме-

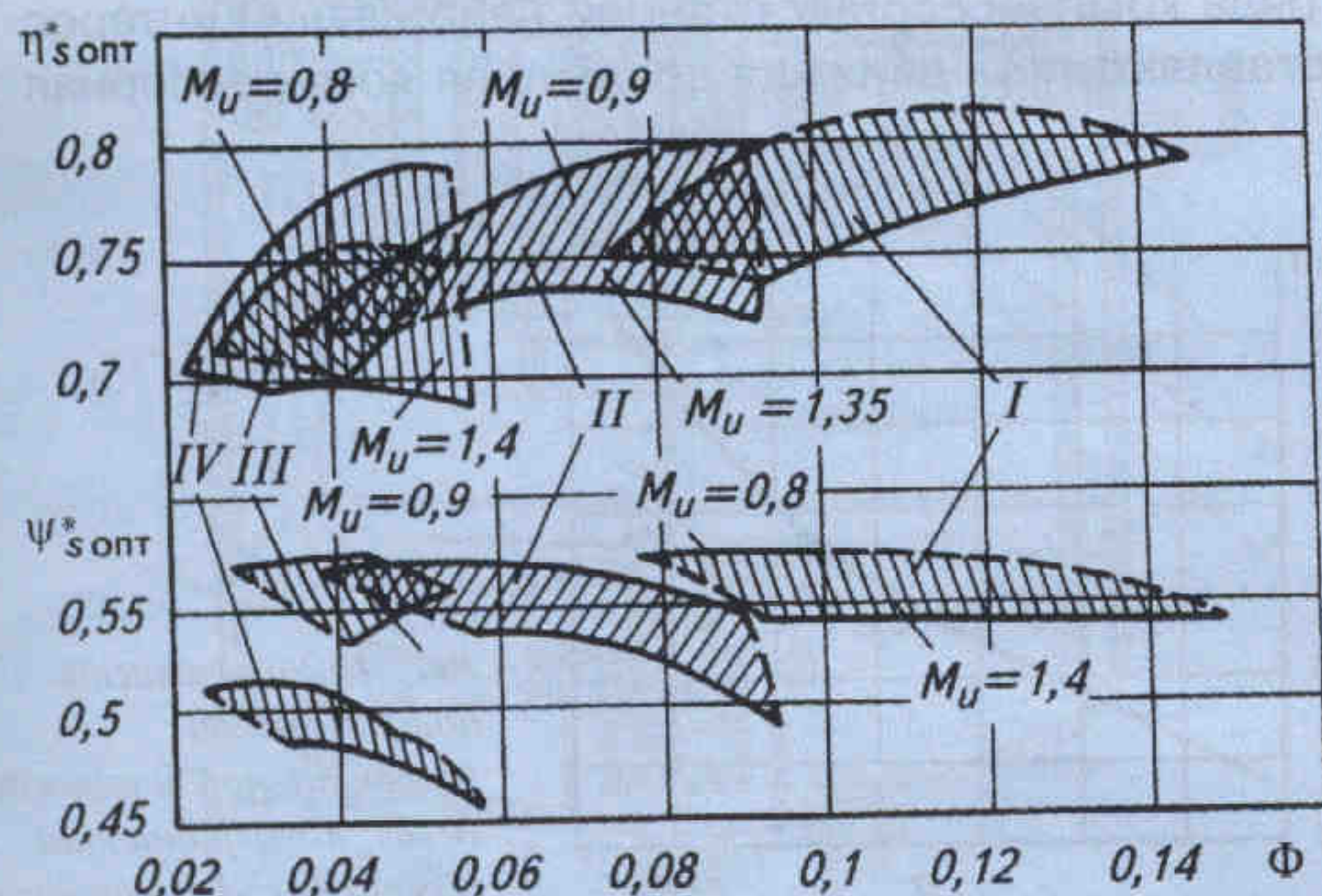


Рис. 1. Поле оптимальных параметров ступеней для холодильных центробежных компрессоров (Φ — коэффициент расхода; $\eta_{s,опт}^*$ — изоэнтропный КПД по полным параметрам; $\psi_{s,опт}^*$ — изоэнтропный коэффициент удельной работы по полным параметрам; M_u — условное число Маха):

I — ступень с пространственным рабочим колесом; II — ступень с рабочим колесом 3Д; III, IV — ступени с рабочим колесом и выходным углом лопаток $\beta_{2\phi}$, равным соответственно 22 и 32°

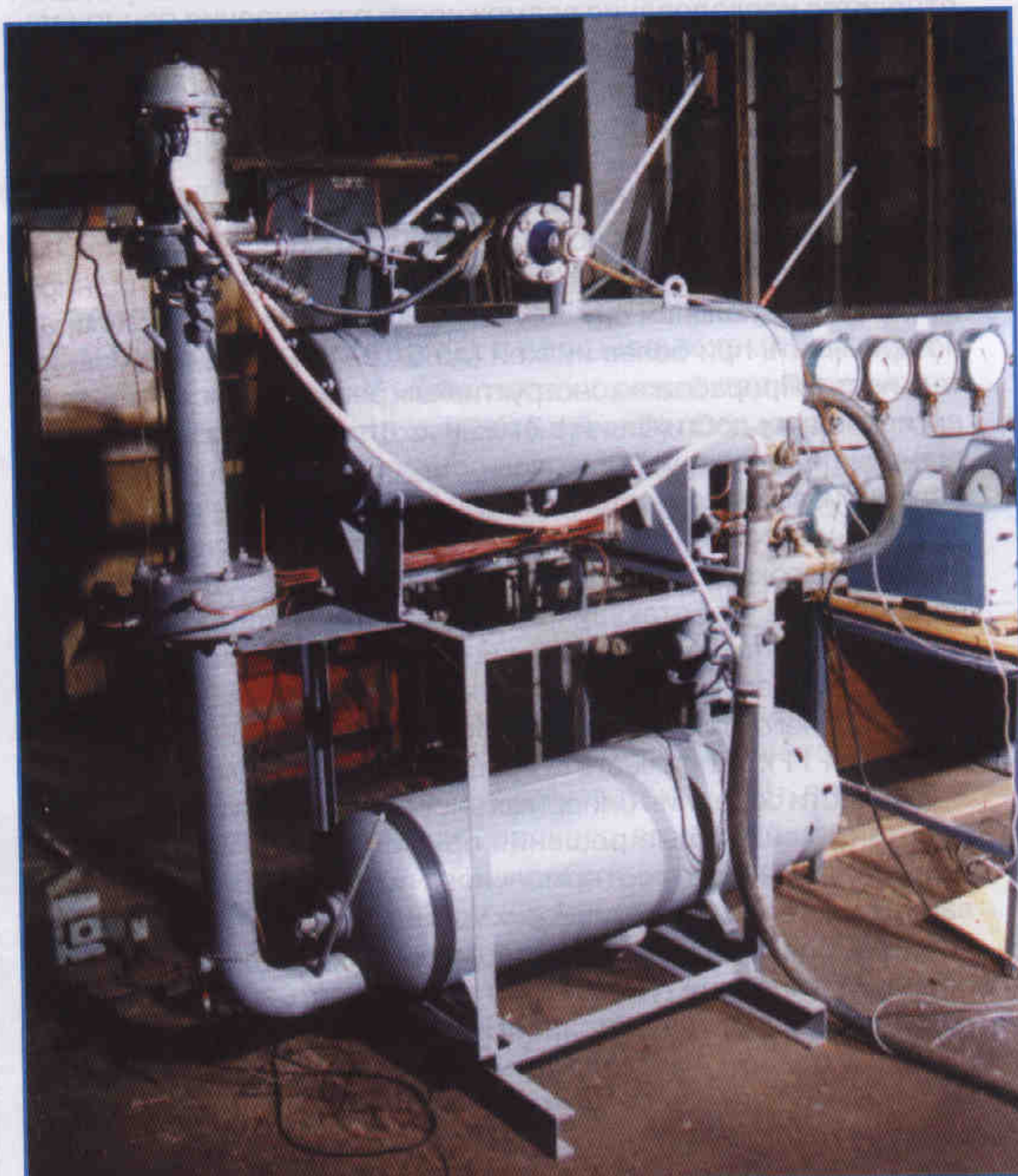


Рис. 3. Макетный образец одноступенчатого центробежного компрессора ($D_2 = 100$ мм) на испытательном стенде



тодик. Для возможных вариантов эксплуатации были получены характеристики турбоагрегатов, рассмотрение которых совместно с характеристиками конденсаторов обеспечило получение рационального решения по доукомплектации станций.

Аналогичную задачу решали и для СОГ-6 Пуровской компрессорной станции. Анализ результатов исследований, выполненных с учетом реальных характеристик турбоагрегатов, показал, что при правильной организации работы на существующем оборудовании холодопроизводительность станции можно увеличить почти в 1,5 раза, обеспечив при этом ее работоспособность при температуре окружающей среды до 30 °С, а также значительно снизить затраты и сократить сроки модернизации.

В современных условиях одно из важнейших направлений исследований, выполняемых совместно с ОАО «Казанькомпрессормаш», – замена в существующем оборудовании запрещенного к применению хладагента R12 на озонобезопасный. Выбору рационального решения по проведению модернизации холодильных машин с центробежными компрессорами предшествовал серьезный анализ влияния свойств хладагентов на параметры холодильных машин. Исследования позволили рекомендовать к применению озонобезопасный хладагент R134a при минимальных переделках холодильной машины, связанных только с изменением передаточного отношения мультипликатора и проточной части компрессора. Стоимость модернизации машин составляет в этом случае около 30 % стоимости машины и выполняется за 5–6 мес. При этом существенно повышаются энергетические показатели холодильных машин благодаря индивидуальному решению задачи и полностью восстанавливается ресурс. Так, при модернизации ХТМФ-248 Новоруральского комбината мощность, потребляемая компрессором, снижена на 25 % при сохранении холодопроизводительности, что подтверждено испытаниями холодильной машины.

В настоящее время отделом накоплен большой опыт в данном направлении: переведены на озонобезопасный хладагент более двадцати холодильных машин типов ХТМФ и ТХМВ, в том числе с одновременным повышением холодопроизводительности при сохранении приводного электродвигателя.

Наличие научно-технической базы во многом способствовало успешному решению задач в новых направлениях, к которым относятся исследования возможности расширения рациональных областей применения центробежных компрессоров в сторону малых холодопроизводительностей, а также создания эффективных бинарных энергетических установок, использующих теплоту геотермальных источников.

Как показали исследования, можно создать конкурентоспособный по энергетическим показателям центробежный компрессор холодопроизводительностью от 20 кВт в режиме кондиционирования. В специальных случаях такие компрессоры целесообразно применять при более низкой (до 5...8 кВт) холодопроизводительности. Проработка конструктивных решений с использованием последних достижений в смежных отраслях позволила спроектировать типоразмерные ряды центробежных компрессоров холодопроизводительностью от 20 до 60 кВт и от 100 до 630 кВт, отличительная особенность которых – наличие встроенного регулируемого высокочастотного электродвигателя и газодинамических подшипников, работающих на хладагенте. В настоящее время изготовлен и проходит испытания макетный образец одноступенчатого компрессора на газодинамических опорах (рис. 3). Диаметр рабочего колеса компрессора 100 мм, мощность электродвигателя 11 кВт при частоте вращения 34000 об/мин.

В области создания бинарных энергетических установок проработаны конкретные решения применительно к параметрам Верхнемутновского геотермального поля Камчатки. Использование бинарных энергетических установок, работающих на низкопотенциальной теплоте геотермального пара или воды, в дополнение к паровой турбине дает возможность значительно увеличить выработку электроэнергии.

Таким образом, развитие научно-технической базы холодильных машин с центробежными компрессорами дает возможность в кратчайшие сроки на высоком техническом уровне решать задачи, связанные с созданием новой техники, доводкой и модернизацией холодильного оборудования и освоением новых областей его применения.

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ВИНТОВЫХ И СПИРАЛЬНЫХ КОМПРЕССОРОВ



Д.Г.КРИНИЦКИЙ,

Отдел роторных и поршневых компрессоров



Канд. техн. наук
Н.Г.БУРДАНОВ

Отдел роторных и поршневых компрессоров

Наряду с конструированием холодильных компрессоров сотрудники отдела роторных и поршневых компрессоров ОАО «ВНИИхолодмаш-Холдинг» совместно с ОАО «Пензкомпрессормаш» проводят активную работу по модернизации воздушных компрессорных станций с винтовыми компрессорами. За последние три года был создан ряд воздушных винтовых компрессоров производительностью от 4 до 40 м³/мин и избыточным давлением нагнетания 0,7...0,9 МПа. В этих компрессорах использован новый профиль зубьев роторов, спроектированный в ОАО «ВНИИхолодмаш-Холдинг» с учетом современных тенденций.

Форма профиля оригинальна и не имеет аналогов. Особое внимание было уделено маслосистеме компрессоров: выбору места впрыска, определению оптимальных значений расхода и температуры подаваемого масла.

Технические характеристики воздушных компрессорных станций с винтовыми компрессорами, а также воздушных винтовых компрессоров приведены в таблице. Результаты испытаний серийного образца воздушного компрессора компрессорной станции 1ВВ-40/9 иллюстрируются рис. 1.

Из ряда компрессорных станций наибольший интерес представляют передвижная воздушная компрессорная

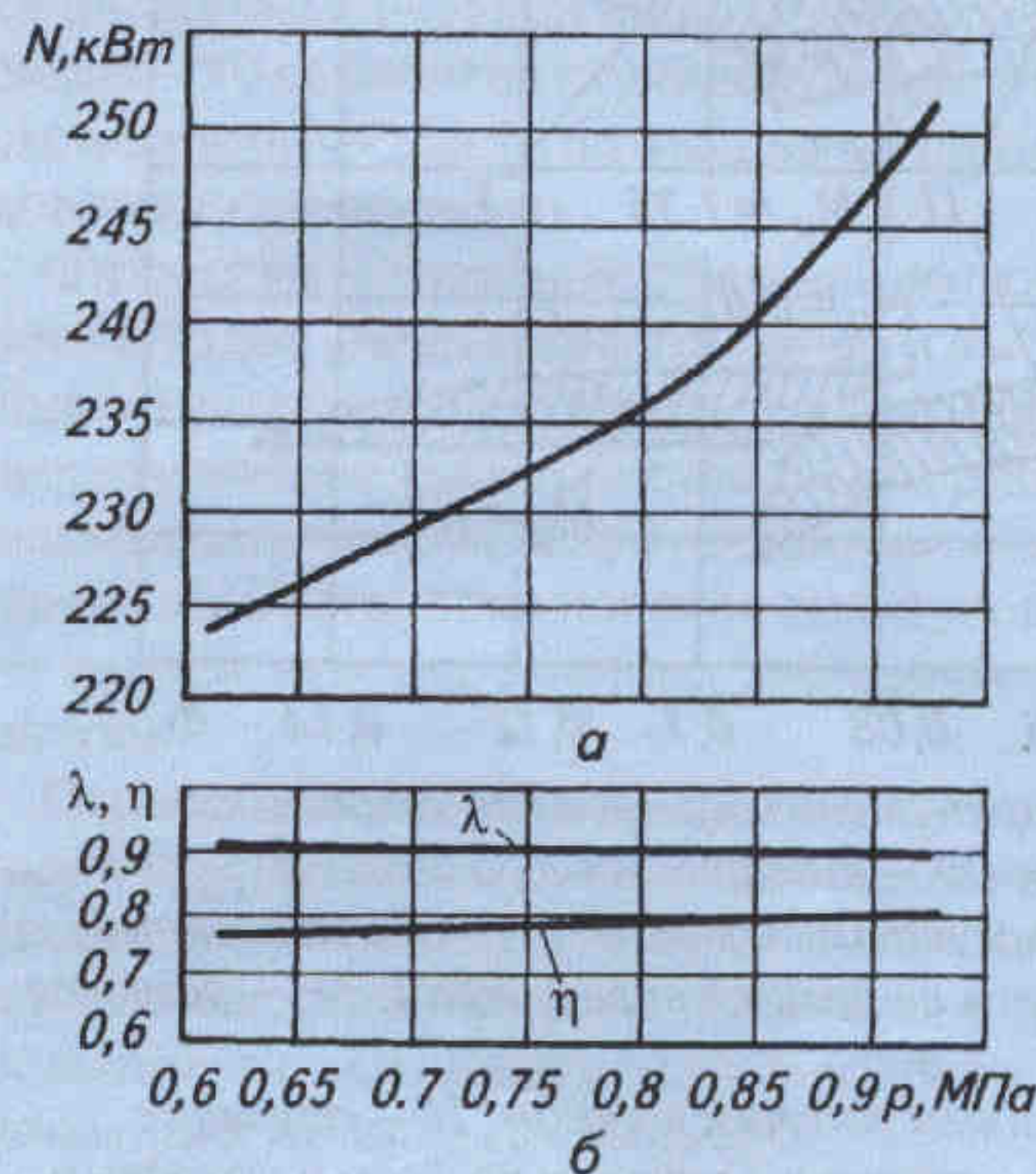


Рис. 1. Зависимость потребляемой эффективной мощности N (а), коэффициента подачи λ и эффективного адиабатного КПД η (б) винтового компрессора компрессорной станции 1ВВ-40/9 от давления нагнетания p (абсолютное)