

**А.В. Смирнов, В.Н. Фесенко, Ю.Б. Наталуха, В.В. Найчук**

ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», ул. Горького, 58, г. Сумы, Украина, 40004

e-mail: tkm@frunze.com.ua

## СОЗДАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВРУ И ДРУГИХ ОБЪЕКТОВ

*За последние десять лет усилия предприятия были направлены на модернизацию и совершенствование поршневых компрессоров. Это позволило изготавливать конкурентоспособные, а также надежные оппозитные поршневые компрессоры высокой эффективности, которые пользуются большим спросом не только в странах СНГ, но и за рубежом. Рассматриваются результаты модернизации компрессорных установок 6VM16-140/200 и 4VM10-55/71. Описываются конструктивные особенности компрессоров 2VM4-10/201 и GT1-0,4/70-75С; применение резонансного наддува в компрессоре 4VM2,5-18/9. Анализируются конструкции быстроходных поршневых машин.*

**Ключевые слова:** Поршневой компрессор. Конструкция. Надёжность. Эффективность. Резонансный наддув. Быстроходный поршневой компрессор. Воздухоразделительная установка.

**A.V. Smirnov, V.N. Fesenko, Yu. B. Nataluha, V.V. Naychuk**

## ESTABLISHMENT AND IMPROVEMENT OF COMPRESSOR EQUIPMENT FOR ASU AND OTHER FACILITIES

*For the last ten years the efforts of the company have focused on modernization and improvement of piston compressors. This allowed producing competitive and reliable opposed piston compressors with high efficiency, that is in high demand not only in CIS countries but also in abroad. The results of modernization of compressor units 6VM16-140/200 and 4VM10-55/71 are considered. The design features of compressors 2VM4-10/201 and GT1-0, 4/70-75S, the application of resonant boost in the compressor 4VM2,5-18/9 are described. The Constructions of high-speed piston engines are analyzed.*

**Keywords:** Piston compressor. Construction. Reliability. Efficiency. Resonant blowing. High-speed piston compressor. Air separation unit.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На предприятии было выпущено более 50 типов компрессорных установок на конечное давление до 250 МПа, мощностью от 7 до 5000 кВт и производительностью от 15 до 100 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$  разных конструкций и комплектаций: оппозитные, V-образные, W-образные; со смазкой и без смазки цилиндрических групп и уплотнений штока; с приводом от синхронного, асинхронного электродвигателей или газопоршневого двигателя.

Многолетний опыт проектирования поршневых машин позволяет предприятию изготавливать качественное оборудование, обеспечивающее сжатым газом многие технологические процессы:

- воздухоразделительных установок (ВРУ), реализующих термодинамические циклы среднего и высокого давлений;
- нефтеперерабатывающих заводов (гидрокре-

кинг высокооктановых бензинов, каталитический риформинг нефти);

- транспортирования природного и попутного нефтяного газов по магистральным газопроводам;
- газлифтной добычи нефти и газового конденсата;
- добычи газового конденсата методом «сайклинг-процесса»;
- метанового органического брожения (получение биогаза);
- установок по производству минеральных удобрений и диоксида углерода;
- дожимных компрессорных станций топливного газа ГПА, ГТ и ГД.

### 2. МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ 6VM16-140/200

В период 1981-1993 гг. было выпущено 80 компрессоров 6В(Г)М16-140/200 для ВРУ АжКжКА-

Арж-2, находящихся на территориях республик СССР и Болгарии [1]. Большинство этих компрессоров эксплуатируется и до нашего времени. На базе 6ВМ16-140/200 были изготовлены четыре новых усовершенствованных компрессора 6ВМ16-150/200 (рис. 1), у которых производительность увеличилась от 140 до 150 м<sup>3</sup>/мин при потребляемой мощности не более 2000кВт (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ характеристик компрессоров 6ВМ16-140/200 и 6ВМ16-150/200

Параметр	6ВМ16-140/200	6ВМ16-150/200
Давление всасывания (абс), кгс/см <sup>2</sup>	0,98	0,98
Давление нагнетания (абс), кгс/см <sup>2</sup>	201	201
Производительность при условиях всасывания, м <sup>3</sup> /мин	140	150
Номинальная мощность компрессора, кВт	1850	1950



Рис. 1. Установка компрессорная 6ВМ16-150/200

Уточненный термодинамический расчёт позволил повысить производительность компрессора за счёт увеличения диаметров цилиндров второй и третьей ступеней.

В итоге снизилось давление и температура на нагнетании первой ступени, выросла производительность компрессора, снизились удельные затраты мощности от 0,192 до 0,156 кВтч/м<sup>3</sup>.

Неуравновешенность компрессора новой модели по силам инерции в рядах сведена к минимуму и находится в пределах 2 %. В этом компрессоре усовершенствована система смазки цилиндров и уплотнений штока и внедрена ограниченная подача смазки. Срок службы масла до его замены составляет не менее одного года.

### 3. МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ 4ВМ10-55/71

Был выпущен ряд поршневых компрессоров для криогенных воздухоразделительных установок. Одним из наиболее востребованных в ВРУ является компрессор 4ВМ10-55/71. Для уменьшения сроков и затрат при монтаже этот компрессор был изготовлен в блочном исполнении. Его преимущества: упрощенная конструкция фундамента; уменьшенное количество заливаемого бетона; отсутствие необходимости в металлоемкой площадке обслуживания; удобный доступ к аппаратам; минимальная стоимость монтажных и строительных работ [2]. Компрессор установлен на раме совместно с газоохладителями и трубопроводной обвязкой.

«Сумское НПО им. Фрунзе» постоянно совершенствует изготавливаемую продукцию, учитывая высокие требования не только к техническим, но и к эксплуатационным характеристикам компрессоров.

Как известно, качество сжимаемого газа напрямую зависит от совершенства применяемого оборудования, в том числе компрессора. Поэтому на базе компрессора 4ВМ10-55/71 был получен новый модернизированный поршневой компрессор для сжатия атмосферного воздуха 4ВМ10-55/71С (рис. 2) без смазки цилиндров и уплотнений штока, что даёт возможность получать сжимаемый газ максимально чистым. Также при работе компрессора без смазки нет формирования нагаро-масляных взрывоопасных образований в клапанных коробках и газоохладителях.



Рис. 2. Поршневой компрессор 4ВМ10-55/71С

Образование ржавчины на поверхности поршня и зеркале цилиндра при всасывании влажного газа ограничивает использование компрессоров без смазки, выполненных с газовым трактом из углеродистой стали. Нами было найдено удачное решение, состоящее в применении влагоотделителя с фильтрами «Гриф» из волоконно-пористого фторопласта. С их помощью полностью удаляется влага из газа, что позволяет эксплуатировать компрессор без смазки цилиндров и уплотнений штоков.

Для безаварийной работы компрессора разработа-

тывается схема с циркуляционной смазкой. В ней привод насоса осуществлен от коленчатого вала. Этим решением исключается всякая возможность отключения масляного насоса при работающем компрессоре. Реализуются также решения, направленные на снижение шумовых характеристик компрессорной установки 4ВМ10-55/71С.

#### 4. УСТАНОВКА КОМПРЕССОРНАЯ 2ВМ4-10/201 С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ ПОРШНЯМИ

Предприятием были выпущены и менее мощные установки, например, компрессор 2ВМ4-10/201, который работает на заводе редких газов в г. Лисичанске [1]. Это двухрядный шестиступенчатый оппозитный компрессор на унифицированной базе 2М4 (рис. 3).



Рис. 3. Установка компрессорная 2ВМ4-10/201

Для выполнения этого компрессора в блочном исполнении с полной заводской готовностью была выбрана кинематическая схема с дифференциальными поршнями (рис. 4), что позволило удобно разместить межступенчатые газоохладители над рядами компрессора без лишних коммуникаций. Более подробная информация приведена в табл. 2.

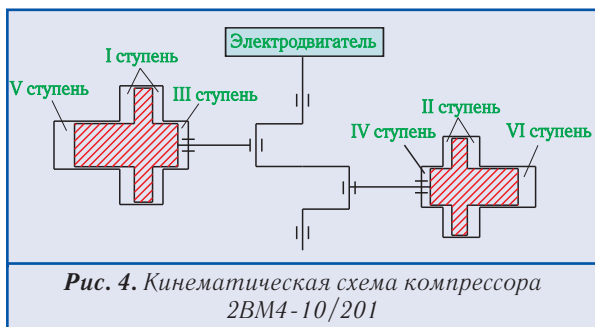


Рис. 4. Кинематическая схема компрессора 2ВМ4-10/201

#### 5. КОМПРЕССОРНАЯ УСТАНОВКА БУФЕРНОГО ГАЗА

В настоящее время в газовой промышленности для транспортирования природного газа на дожимаю-

щих и линейных компрессорных станциях магистральных газопроводов используются газоперекачивающие агрегаты, имеющие в своем составе нагнетатели с сухими газодинамическими уплотнениями (СГУ). В системах СГУ, применяемых на объектах газовой промышленности в ГПА, для обеспечения требуемого перепада между давлением буферного газа и полостью всасывания газ отбирается из коллектора нагнетания. Снижение требуемого перепада давления при работе ГПА вызывает прорыв неочищенного газа с нагнетания компрессора к СГУ и вывод его из строя. Для предотвращения указанных поломок нашим предприятием была изготовлена дожимная компрессорная установка (ДКУ) ГТ1-0,4/70-75С (рис. 5.) для подачи газа с линии требуемого давления и расхода в полость буферного газа, которая обеспечивает необходимый перепад давления во время запуска, без использования посторонних источников.

Таблица 2. Технические характеристики компрессора 2ВМ4-10/201

Характеристика	Значение
Давление всасывания (абс), кгс/см <sup>2</sup>	0,98
Давление нагнетания (абс), кгс/см <sup>2</sup>	201
Производительность при условиях всасывания, м <sup>3</sup> /мин	10,2
Частота вращения вала, мин <sup>-1</sup>	750
Мощность электродвигателя, кВт	160
Масса компрессорной установки с двигателем, т	9
Габаритные размеры установки, мм	1850×4600×2550

Перед нами были поставлены жесткие требования к системе подготовки буферного природного газа. С ними успешно справились сотрудники предприятия. В результате удалось достичь: отсутствия масла в буферном газе; очистки природного газа от механических частиц размером более 10 мкм и капельной влаги; требуемого перепада давления «газ-газ» на СГУ не менее 0,35 МПа, который создается для преодоления гидравлического сопротивления технологических трубопроводов; обеспечения подачи на СГУ буферного газа требуемого расхода от 800 до 1600 нм<sup>3</sup>/ч, хотя фактический расход буферного газа при рабочем перепаде обычно не превышает 200-600 нм<sup>3</sup>/ч; обеспечения возможности регулирования расхода буферного газа; обеспечения автоматизации процессов запуска, остановки и сброса газа из компрессора на свечу; раз-



Рис. 5. ДКУ ГТ1-0,4/70-75С

мещения оборудования в автономном контейнере полной заводской готовности, либо на единой раме для размещения в ангаре ГПА.

Основными особенностями установки являются: использование неразъемного шатуна с подшипниками качения, позволяющими избавиться от масляного насоса и применить смазку разбрызгиванием; использование эксцентрикового коленчатого

вала при разработке кривошипно-шатунного механизма, что позволило создать неразъемный картер.

## 6. НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Одним из способов повышения производительности поршневого компрессора является резонансный наддув [3-4], который уже длительное время применяют в двигателях внутреннего сгорания. Для достижения резонансного наддува необходимо совпадение частот собственных колебаний давления газа во всасывающем трубопроводе с частотой возмущающих импульсов компрессора по второй гармонике. При этом условии положительное значение амплитуды колебания давления газа совпадает с моментом закрытия всасывающих клапанов.

В режиме резонансных явлений на предприятии был испытан поршневой компрессор 4ВМ2,5-18/9 (рис. 6).



Рис. 6. Проведение испытаний компрессора 4ВМ2,5-18/9 в режиме резонансного наддува

Испытания установки проводились на стенде с всасыванием воздуха из атмосферы и его последующим выбросом в окружающую среду. Первый этап испытаний проводился с отключенными трубопроводами всасывания первых ступеней. Затем в ходе испытаний всасывающие трубопроводы наращивали отрезками труб длиной 0,1-0,5 м и внутренним диаметром 0,15 м; при всех изменениях трубопровода измеряли производительность, мощность на валу компрессора, температуру всасываемого и нагнетательного воздуха. С помощью современного оборудования при каждой длине трубопровода было проведено испытание компрессорной установки (рис. 7).

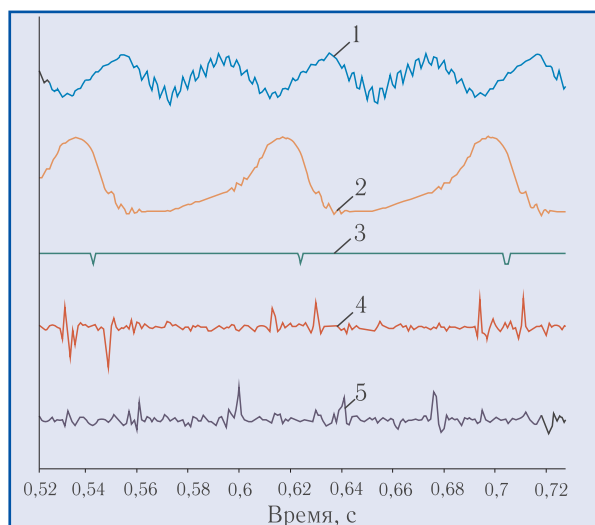


Рис. 7. Результаты исследований компрессорной установки 4ВМ2,5-18/9 с использованием программного комплекса PowerGraph для обработки следующей информации: 1 — пульсации давления газа перед клапаном; 2 — индикаторная диаграмма полости цилиндра со стороны крышки; 3 — отметчик верхней мертвой точки; 4 — моменты открытия и закрытия нагнетательного клапана; 5 — моменты открытия и закрытия всасывающего клапана

Эксперименты позволили получить следующий результат: повышение производительности компрессора на 10 % (увеличение мощности практически пропорционально увеличению производительности); в момент закрытия клапана давление в цилиндре на 23 % выше номинального; угол закрытия всасывающего клапана смещен более чем на 20 °; выросла температура нагнетания первой ступени на 8 °С; значение оптимальной резонансной длины составило 2,25 м. Для более детального анализа влияния резонансного наддува на работоспособность компрессора предприятие продолжает проводить испытания с применением современного оборудования для мониторинга рабочего процесса установки.

## 7. СОЗДАНИЕ БЫСТРОХОДНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА БАЗАХ 2ГМ10 И 6М25

Чтобы конкурировать с ведущими зарубежными компаниями, ПАО уделяет большое внимание совершенствованию поршневых компрессоров. Одним из важных показателей компрессора является частота вращения приводного двигателя. При разработке быстроходной компрессорной установки удается значительно уменьшить ее массогабаритные показатели [5]. Поэтому на базе 2М10 был изготовлен и сдан в эксплуатацию быстроходный поршневой компрессор 2ГМ10А-П-18/9-26, на котором также проводились испытания в режиме резонансного наддува (рис. 8).



Рис. 8. Испытание быстроходного поршневого компрессора 2ГМ10А-П-18/9-26

На базе 6М25 также был разработан быстроходный шестирядный оппозитный поршневой компрессор (см. рис. 9). Массогабаритные характеристики компрессоров 2М10 и 6М25 удалось значительно снизить при переводе их на быстроходный режим работы (табл. 3).

Таблица. 3. Сравнительный анализ массогабаритных характеристик быстроходных и тихоходных поршневых компрессоров

Характеристика	2ГМ10	2ГМ10А	6М25	6М25А
Габаритные размеры в плане, мм	2760× ×1700	1950× ×1500	8440× ×4565	4440× ×2860
Масса компрессора, т	3,2	2,1	16,6	13,6

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все выпускаемые предприятием компрессоры удобны в обслуживании, надежны в эксплуатации, оснащены системами автоматического управления на базе современных программируемых микропроцессоров. Компрессоры комплектуются запасными частями и набором специнструмента для обслуживания. Применяемые конструкции и материалы позволяют обес-

печить ресурс работы компрессоров до капитального ремонта не менее 55 тыс. ч. Компрессоры с поршневым усилием до 10 т включительно выпускаются в полной заводской готовности, собраны на общей металлической раме вместе с приводным двигателем, трубопроводами, вспомогательными системами и средствами автоматической системы управления. Создание новых типов компрессоров сопровождается совершенствованием опытных узлов изделий с использованием современной системы диагностики.

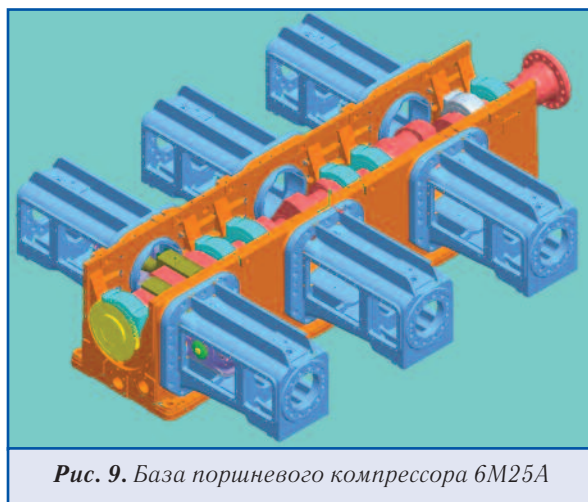


Рис. 9. База поршневого компрессора 6М25А

Имея более чем 100-летний производственный опыт, ПАО «Сумское НПО им. Фрунзе» готово спроектировать и изготовить любую компрессорную установку по требованиям заказчика с гарантией высокого качества и в соответствии со стандартом Американского нефтяного института API 618.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Характеристики и опыт эксплуатации поршневых многоступенчатых компрессоров для воздухоразделительных установок средней производительности/ **А.В. Смирнов, Ю.Б.Наталуха, Н.П.Гринь и др.** //Технические газы. — 2006. — № 3. — С. 37-40.
2. **Гринь Н.П., Наталуха Ю.Б., Смирнов А.В.** Разработка компрессора блочной конструкции 4ВМ10-55/71 для ВРУ среднего давления// Технические газы. — 2010. — № 6. — С. 31-35.
3. **Рутковский Ю.А.** Работа поршневого компрессора при наличии колебаний давления воздуха во всасывающем трубопроводе // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2008. — №3. — С. 83-92.
4. Колебания и вибрации в поршневых компрессорах/ **Ю.А. Видякин, Т.Ф. Кондратьева, Ф.П. Петрова, А.Г. Платонов.** — Л.: «Машиностроение», 1972. — 224 с.
5. Выбор параметров быстроходных оппозитных баз поршневых компрессоров М10А и М25А / **А.В. Смирнов, В.Н. Фесенко, М.А. Туренко, А.И. Онищенко** // Компрессорная техника и пневматика. — 2011. — № 8. — С. 2-5.