

В.Ю. Семенов, канд. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия);

Ю.А. Лаухин, А.В. Козлов, кандидаты техн. наук, С.Б. Малахов, Г.Н. Левдик, М.Ю. Прокшин (г. Москва, Россия)

Результаты экспериментальных исследований криогенного волнового детандер-компрессора

Эффективность криогенных установок определяется совершенством используемых в них машин и аппаратов, в том числе применяемых расширительных устройств — криогенераторов холода. В настоящее время наиболее эффективным устройством с точки зрения термодинамического совершенства является турбодетандер, однако он имеет сложную конструкцию, высокую стоимость и должен отвечать высоким эксплуатационным требованиям. Существуют также определенные технические ограничения в использовании криогенераторов данного типа, связанные с высокой частотой вращения ротора, характерной для криогенных установок с малым расходом легких газов. В связи с этим возникла необходимость разработки и исследования альтернативных источников холода — невысокой стоимости, более простых по конструкции и надежных в эксплуатации.

В 80-е годы прошлого века было выполнено множество исследований безмашинных методов получения холода, основанных на резонансно-акустическом принципе преобразования энергии газа [1, 2]. Достигнутая величина адиабатного КПД лучших конструкций криогенераторов этого типа не превышала 20–25 %.

КПД других известных в настоящее время генераторов холода (дроссели, вихревые трубы, Vortex-tubes и т.д.) не более 20 %.

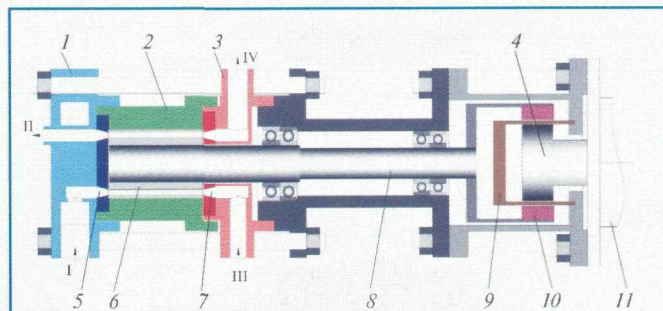
Разработаны также устройства, аналогичные по назначению классическому детандер-компрессору и не уступающие ему по термодинамической эффективности. Так, в «волновом детандере» (далее ВД) энергия от одного газа к другому передается при их контакте через волны сжатия–разряжения. Пионерские работы в этом направлении проведены за рубежом в середине прошлого века [3–5], а затем продолжены во ВНИИГАЗе [6–9] и в ХАИ им. Н.Е. Жуковского [6, 7, 10]. Конечный результат этих работ — успешная промышленная эксплуатация разработанной конструкции волнового детандера ВД-1 в качестве генератора холода установки отбензинивания газов Сосногорского ГПЗ и успешная промышленная эксплуатация волнового детандера ВД-3 в составе установки исследования технологии извлечения из пласта остаточных запасов ретроградного конденсата на Вуктыльском (Республика Коми) газоконденсатном месторождении. Следует отметить, что полученные результаты исследований и эксплуатации ограничены областью положительных температур

и большими объемными расходами перерабатываемого газа (до 20 тыс. м³/ч) [8, 9].

Из-за различия в назначении условия работы криогенных генераторов холода, в том числе криогенных ВД, существенно менее благоприятны. Являясь частью установки для производства холода на заданном уровне температур, значительно более низком, чем температура окружающей среды, или частью установки по низкотемпературному ожижению газа, криогенераторы устанавливаются после теплообменных аппаратов, что предопределяет низкую входную температуру рабочего газа. Данное обстоятельство часто осложняется малыми величинами перерабатываемых массовых расходов и высоких входных давлений, что приводит к очень малым величинам объемных расходов газа.

В данной работе проведена экспериментальная проверка возможности создания ВД и исследовано влияние отдельных конструктивных параметров на термодинамическую эффективность ВД, работающего в области криогенных температур с относительно небольшим расходом (в диапазоне 500–1800 м³/ч) природного газа.

Для исследований была разработана соответствующая конструкция ВД (**рис. 1**), который состоит из



**Рис. 1. Конструкция
криогенного волнового детандер-компрессора:**

I, II — вход и выход расширяемого (активного) потока газа; III, IV — вход и выход компримируемого (пассивного) потока газа; 1, 3 — газораспределитель соответственно активного и пассивного потоков газа; 2 — корпус ротора; 4, 10 — ведущая и ведомая магнитные полумуфты; 5, 7 — сопло соответственно активного и пассивного потоков газа; 6 — ротор; 8 — вал ротора; 9 — керамическая втулка; 11 — двигатель

цилиндрического ротора, вращающегося между торцовыми дисками.

Ротор (рис. 2) представляет собой титановый цилиндр с центральным отверстием для установки на вал и периферическими прямоугольными отверстиями для прохода газа.

В торцовых дисках имеются также отверстия для подвода и отвода активного газа высокого давления и отвода пассивного газа низкого давления.

Привод ротора осуществляется стандартным асинхронным двигателем мощностью 700 Вт и частотой вращения до 6 тыс. об/мин. С целью передачи вращающего момента в герметичную полость используются магнитные муфты.

Расположение вала — консольное, что позволяет поместить подшипниковую группу в «теплой» зоне устройства. Сопла и газораспределители обеспечивают два цикла работы за один оборот вала.

Для экспериментальных исследований и апробации разработанной конструкции в реальных условиях был создан экспериментальный стенд (рис. 3).

Технологическая обвязка стенда и система измерений позволяют исследовать характеристики ВД на различных режимах работы и провести комплекс измерений параметров потоков.

Особенностью схемы является замкнутый контур пассивного газа. В качестве активной среды использовали природный газ, подаваемый с выхода аккумулятора компрессорной АГНКС.

При расчете рабочего процесса в волновом детандере-компрессоре использовали математическую модель [10], согласно которой одномерное нестационарное течение в каналах ротора описывается системой дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы, импульса, энергии и состава.

При этом используется математический аппарат нестационарных источников и стоков, воспроизводящих поступление и уход среды.

Решение системы уравнений осуществлялось численным методом распада-разрыва С.К. Годунова. Предварительные расчеты показали высокую эффективность ВД в области криогенных температур — адiabатный КПД достигает 0,75 при степени расширения $\pi_T = 1,6$.

При проведении исследований измеряли и регистрировали следующие параметры:

- давление природного газа на входе и выходе ВД — в диапазоне 4,0–1,2 МПа;
- температуру природного газа
 - по активному потоку на входе и выходе — в диапазоне соответственно 196–227 К и 179–202 К;
 - по пассивному потоку на входе и выходе — в диапазоне соответственно 275–305 К и 312–381 К;
- расходы активного и пассивного потоков — в диапазоне соответственно 420–1400 м³/ч и 130–310 м³/ч;
- суммарный осевой зазор между соплами и ротором — в диапазоне 0,045–0,1 мм.

Анализ результатов экспериментальных данных подтвердил сделанные в работах [7, 8] выводы о максимальной эффективности волнового детандера в области степени расширения активного потока $\pi_T < 2,5$, что определено термодинамическими особенностями процесса выхлопа.

При этом степень сжатия пассивного потока π_K приблизительно равнялась степени расширения активного π_T , а расход пассивного газа $Q_{п}$ составлял 25–30 % от активного потока $Q_{а}$.

При анализе составляющих необратимости рабочего процесса расширения газа в машинах малой производительности следует выделить перетечки рабочего тела из полости высокого давления в полость низкого. Очевидно, величина этих перетечек, применительно к разработанной конструкции ВД, пропорциональна суммарному осевому зазору между ротором и соплами.

Установлено, что уменьшение относительного суммарного осевого зазора $\bar{\Delta} = \Delta/D_{ср}$ (где $D_{ср}$ — средний диаметр каналов ротора) от 0,1 до 0,045 мм обеспечивает увеличение КПД на 10 %.



Рис. 2. Ротор волнового детандер-компрессора



Рис. 3. Общий вид испытательного стенда

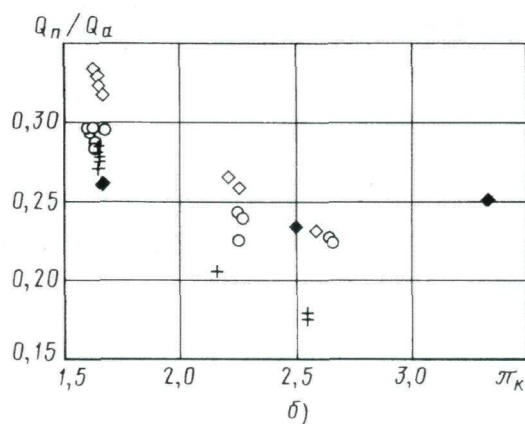
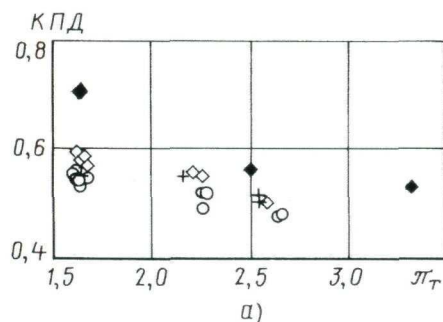


Рис. 4. Влияние степени расширения активного потока π_t на адиабатный КПД (а) и степени сжатия пассивного потока π_k на относительный расход Q_n/Q_a (б) при изменении относительного суммарного осевого зазора $\bar{\Delta}$:

◆ – расчет; ○ – $\bar{\Delta} = 0,00169$; + – $\bar{\Delta} = 0,00120$; ◇ – $\bar{\Delta} = 0,000818$

Как показало сопоставление результатов расчета по математической модели (рис. 4) и экспериментальных данных, расхождение в области малых степеней расширения не превышает 20 %, что объясняется возрастанием влияния перетечек при небольших расходах. При степени расширения $\pi_t = 2 \div 2,5$ данное расхождение не превышает погрешности эксперимента.

На разработанной и апробированной в реальных условиях конструкции ВД при входящих температурах 238–172 К получены следующие результаты:

- при степени расширения активного потока до $\pi_t = 1,5$ достигнут адиабатный КПД 60 %;
- в более широком диапазоне степеней расширения $\pi_t = 2 \div 2,5$ адиабатный КПД 50 %;
- подтверждена устойчивая работа ВД в условиях сильной загрязненности примесями (вода, масло, тяжелые углеводороды), а также при появлении двухфазной среды метана на выходе активного потока.

Данные характеристики заметно превышают эффективность, достигнутую во всех альтернативных конструкциях криогенераторов.

По сравнению с современными высокоэффективными турбодетандерами, несмотря на некоторый проигрыш в эффективности в диапазоне степеней расширения $\pi_t > 2,5$, разработанный криогенный ВД имеет неоспоримые преимущества:

- существенно меньшая стоимость самого устройства;
- высокая надежность эксплуатации, что обусловлено существенно меньшей частотой вращения и конструктивной простотой организации волновых процессов.

Список литературы

1. Архаров А.М. Развитие безмашинных газодинамических (волновых) методов генерации холода // Сб. научн. докл. III Всесоюзной научно-техн. конференции «Криогенная техника-82». 1983. Ч. 1. С. 33–46.

- 2. Архаров А.М., Бондаренко В.Л., Десятов А.Т., Пронько Б.Г.** Эффект охлаждения при волновом адиабатном расширении газа // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1981. № 2. С. 139–142.
- 3. Azoury P.H.** Introduction to the Dynamic Pressure Exchanger // Proceedings, Institution of Mechanical Engineers. 1965–1966. Vol. 180, part 1. No 18.
- 4. Уэтэрсон Р., Герцберг А.** Энергообменник – новая концепция в теории высокоэффективных газотурбинных циклов // Энергетические машины и установки. 1967. № 2. С. 48–62.
- 5. Кентфилд Дж.** Характеристики обменников давления – делителей и уравнителей // Труды ASME. Ser.D. 1965. № 3.
- 6. Бобров Д.М., Лаухин Ю.А., Сиротин А.М. и др.** Генераторы холода на базе волновых обменников давления // Газовая промышленность. 1993. № 1. С. 48–62.
- 7. Эрсмамбетов В.Ш., Лаухин Ю.А., Бобров Д.М. и др.** Результаты численных и экспериментальных исследований волнового детандера // Химическое и нефтяное машиностроение. 1996. № 5. С. 14–16.
- 8. Бобров Д.М., Лаухин Ю.А., Сиротин А.М.** Расширительная холодильная техника для газовой и нефтяной промышленности – современное состояние, тенденции развития, опыт эксплуатации // Обзорно-информатическая серия. Подготовка и переработка газа и газового конденсата. М.: ИРЦ «Газпром», 2002. 88 с.
- 9. Козлов А.В.** Повышение эффективности эксплуатации волновых детандеров в установках низкотемпературной обработки углеводородного газа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. 19 с.
- 10. Эрсмамбетов В.Ш.** Совершенствование модели процесса и исследования режимов работы волнового обменника давления, предназначенного для наддува дизеля: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харьков. 1988. 26 с.