

лать после серии стендовых испытаний, учитывающих и приведенные расчетные исследования.

Список литературы:

1. Левтеров А.М., Левтерова Л.И. Выбор модели рабочего процесса ДВС, работающего на топливах растительного происхождения // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2006. – №26. – С. 13 – 118. 2. Куценко А.С., Левтерова Л.И. Прогнозирование техникоэкологических характеристик ДВС на водородосодержащих топливных смесях // Проблемы машиностроения. – 1992. – Вып. 38. – С. 86 – 89. 3. Куценко А.С. Моделирование рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания на ЭВМ. – К.: Наук. думка, 1988. – 100 с. 4. Blumberg P., Kummer J.T. *Combust. Sci. Technol.* – 1971. – №4. – P. 73 – 96. 5. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.И. *Окисление азота при горении.* – М.: Изд. АН СССР, 1947. – 145 с. 6. BOSCH, *Автомобильный справочник: Перевод с англ.*

лийского. – 1е изд. – М.: ЗАО «ЮЖИ» За рулем, 2002. – 895 с. 7. Чесноков С.А., Кузьмин И.В., Соколова С.С. Моделирование динамики поверхности горения на основе химической кинетики реакций неоднородной бензовоздушной смеси // *Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей: Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф.* – Владимир, 2003. – С. 186 – 189. 8. Матиевский Д.Д., Куманакоев С.П. Применение смесевых спиртовых топлив в дизелях автотракторного типа /http://aomai/sesna/ru:8080/Books/Files/Vestn_2000_02/11/11/htm. 9. Лиханов В.А., Плотников С.А. Особенности процесса сгорания метанолотопливной эмульсии в тракторном дизеле // *Двигателестроение.* – 1996. – №1. – С. 26 – 28. 10. Карасев В.А., Смирнов О.В. Влияние массового отношения топлив на динамику сгорания в двигателе с двухстадийным, послыйным сгоранием // *Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей: Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф.* – Владимир, 2003. – С. 200 – 203.

УДК 621.56

А.И. Крайнюк, д-р техн. наук, А.А. Крайнюк, канд. техн. наук, М.А. Брянцев, инж.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ КАСКАДНОГО ОБМЕНА ДАВЛЕНИЕМ В РАБОЧЕМ ЦИКЛЕ ГАЗОВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

Введение

Значительная составляющая общего потребления энергоресурсов современной цивилизации связана с производством холода технологического и бытового назначения. Развитие криогенных технологий сепарации, очистки и сжижения нефтяного и природного газов, извлечения углеводов из свалочного, шахтного и биологических газов, наряду с глобализацией производства продуктов питания, укрупнением рынков животноводства и морепродуктов порождают растущую потребность в мощных установках низкотемпературного охлаждения.

В настоящее время возобновляется интерес к использованию воздушных (газовых) холодильных установок (ВХУ), имеющих большой потенциал низкотемпературного охлаждения без использования низкокипящих рабочих тел.

Формулирование проблемы

Холодильный коэффициент воздушных установок при относительно небольших отношениях температур окружающей среды и охлаждаемого объекта уступает показателям пароконденсационных установок, однако в области глубокого охлаждения рабочий цикл воздушной ВХУ с регенерацией реализует более высокую энергетическую эффективность. Немаловажным является экологический аспект привлекательности ВХУ воздушных машин, особенно в свете решения Монреальского совещания, запрещающего использование в качестве хладагентов озоноразрушающих веществ.

Вместе с тем, получающие распространение воздушные установки на базе турбодетандеров дорогостоящи в изготовлении и ввиду высокой частоты вращения ротора турбины имеют ограниченный ре-

урсе, требуют высокого уровня технического обслуживания.

Возможность удешевления ВХУ связывается с использованием в качестве детандера–компрессора волнового обменника давления (ВОД), аналогичного по конструкции агрегату воздухоснабжения системы наддува ДВС “Comprex”.

В роторе ВОД в процессе непосредственного обмена энергией между сжимающей и сжимаемой средами наряду с охлаждением газового (воздушного) потока осуществляется сжатие до 25...30 % хладагента. Большая часть хладагента сжимается в отдельной, основной ступени компрессора, приводимого от внешнего источника механической энергии.

К преимуществам волнового турбодетандера–компрессора относятся простота и надежность конструкции устройства, а также более низкая относительно турбоагрегата частота вращения ротора (6500...10000 мин⁻¹).

Следует заметить, что несмотря на лаконичность устройства, работа ВОД характеризуется сложностью газодинамических процессов, протекающих в напорообменных каналах ротора. Волновой характер обмена энергией предопределяет высокую чувствительность рабочего процесса ВОД к картине взаимодействия первичных волн с передними кромками газораспределительных окон. Отклонение режима работы ВОД от расчетных условий по частоте вращения ротора, давлению и температуре рабочих сред сопровождается резким ухудшением показателей его работы как вследствие рассогласования фаз движения первичных волн, так и вследствие неполноты вытеснения сжатого воздуха из ячеек ротора. Увеличение доли сжатого воздуха, оставшегося в ячейке в момент ее разобщения с окнами высокого давления, вызывает почти пропорциональное снижение к.п.д., аналогично негативному эффекту так называемого «мертвого» объема в поршневом компрессоре. Кроме того, неизбежные диссипативные

явления в процессах формирования и взаимодействия сильных ударных волн ограничивает к.п.д. лучших образцов волновых обменников давления на расчетных режимах значениями 0,55...0,56 [1].

К недостаткам ВОД следует отнести практическое ограничение, по критерию эффективности обменных процессов, степени повышения давления в одной ступени значениями $\pi_k = 2,5...2,8$.

Решение проблемы

Более широкую перспективу совершенствования эксплуатационных показателей ВХУ раскрывает использование в качестве детандера, а также в качестве основного компрессора принципиально новой разновидности энергообменных устройств – каскадного обменника давления (КОД) [2].

В разработанном на кафедре ДВС ВПУ им. В.Даля КОД обмен энергией осуществляется в условно стационарных статических многоступенчатых процессах массообмена с формированием волн незначительной эффективности. Поэтому рабочий процесс характеризуется более высокой эффективностью и меньшей чувствительностью к рассогласованию частоты вращения ротора.

Принцип действия КОД иллюстрируется рисунком 1, где схематизирована развертка ячеек ротора относительно газораспределительных окон и массообменных каналов статора.

Активная среда, поступающая из окна ГВД в ячейку ротора, «досжимает» предварительно сжатый воздух до уровня сопротивления сети и вытесняет его через окно ВВД к потребителю.

Потенциальная энергия рабочих сред после разобщения с окнами высокого давления полезно используется для предварительного сжатия свежего воздуха в период последовательно сообщения рассматриваемой ячейки посредством напорообменных каналов с ячейками участка сжатия. При этом в процессе каскадного массообмена давление в каждой из

ячеек в период её движения на участке расширения ступенчато снижается, а на участке сжатия – ступенчато повышается.

При подключении ячейки к окнам низкого давления ГНД и ВНД осуществляется принудительная продувка свежим зарядом.

В идеализированном цикле КОД имеет место примерное равенство объемных расходов сжимаемого воздуха и сжимающего газа, поэтому отношение массовых расходов этих сред близко обратному отношению их температур. Отмеченное является косвенным подтверждением более высокого к.п.д. КОД относительно ВОД, практически реализующего в составе системы наддува ДВС равенство массовых расходов сжимаемой и сжимающей сред.

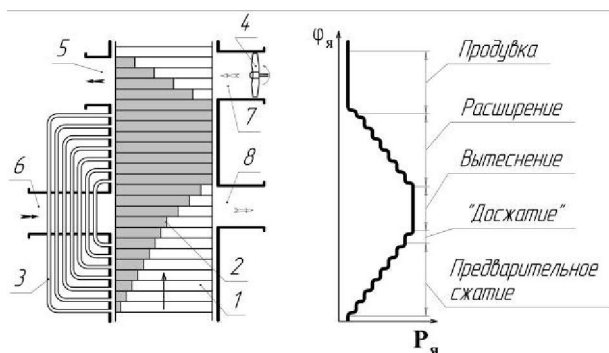


Рис. 1. Схема развертки ротора КОД относительно окон и каналов статора:

1 – ячейки ротора; 2 – условная контактная граница сжимающей и сжимаемой сред; 3 – массообменные каналы статора; 4 – продувочный вентилятор; 5 – окно газов низкого давления (ГНД); 6 – окно газов высокого давления (ГВД); 7 – окно воздуха низкого давления (ВНД); 8 – окно воздуха высокого давления (ВВД)

Замечательная особенность рабочего цикла КОД заключается в незначительном влиянии неполноты вытеснения сжатого воздуха из ячеек ротора к потребителю («мертвого» объема) на эффективные показатели обменника. Причина такой нечувствительности вполне объяснима. Энергия сжатого воздуха, оставшегося в ячейке после разобшения с ок-

ном ВВД, участвует в процессе каскадного массообмена и, следовательно, наряду с энергией сжимающего газа в ячейке непосредственно расходуется на последующее сжатие свежего заряда.

К эксплуатационным преимуществам КОД относится возможность осуществления рабочего процесса при более низких частотах вращения ротора (1500...3000 мин⁻¹) относительно частоты вращения ротора ВОД (8000...12000 мин⁻¹).

Испытания ряда опытных образцов подтвердили эффективность обменных процессов в КОД в диапазоне рабочих режимов до $\pi_k = 4...4,2$. На режиме $\pi_k = 2,5$ при отношении температур сжимающего и сжимаемого газов $\Theta = 1,82$ (частота вращения ротора – 2750 мин⁻¹) коэффициент полезного действия КОД достигает значений 0,82.

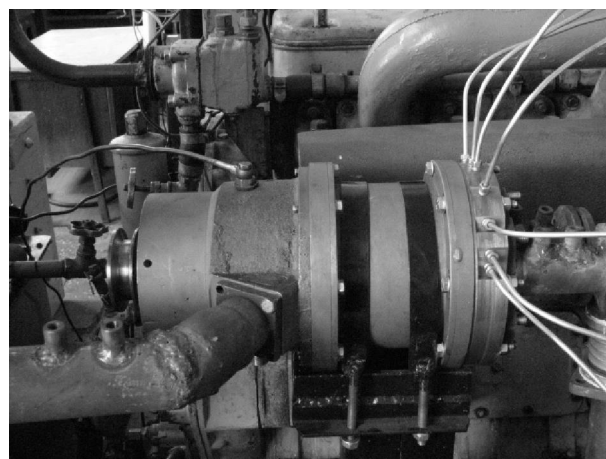


Рис. 2. Опытный образец КОД

Отмеченные выше свойства КОД позволяют осуществлять рабочий цикл газовой (воздушной) холодильной машины без использования компрессора основной ступени сжатия хладагента.

В разработанном авторами устройстве бескомпрессорной ВХУ с КОД (см. рис. 3, 4) один из каскадных обменников (КОД1) выполняет функции детандера-компрессора, другой – КОД2 – умножителя расхода сжатого в КОД1 воздуха.

В простейшем устройстве ВХУ КОД без регенерации сжатый воздух через окно 1 поступает в КОД1, где расширяясь охлаждается, одновременно совершая работу сжатия воздуха, подводимого в КОД1 через окно 4 из холодильной камеры. Холодный воздух из КОД1 через окно 3 непосредственно подается в холодильную камеру.

Сжатый в ячейках ротора КОД1 воздух посредством циркуляционного вентилятора ЦВ проталкивается через утилизационные теплообменники ТА₂, ТА₃ и источник подвода теплоты НВ, где подогревается.

В результате повышения температуры объемный расход сжатого в КОД1 воздуха значительно увеличивается, что обеспечивает соответствующее повышение производительности КОД2, сжимающего воздух, поступающий через окно 8 из окружающей среды.

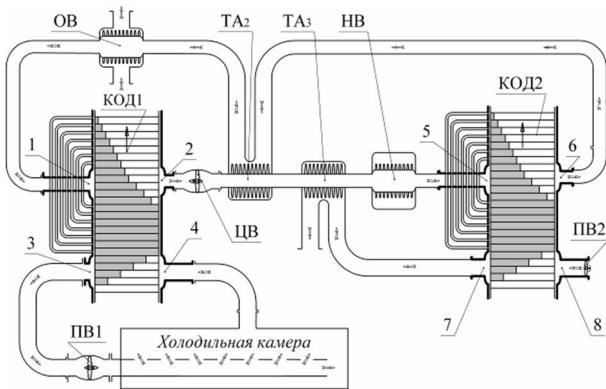


Рис. 3. Принципиальная схема воздушной холодильной установки на базе КОД без регенерации

1, 2 – соответственно окна подвода и отвода высокого давления детандера-компрессора; 3, 4 – соответственно окна отвода и подвода низкого давления детандера-компрессора; 5, 6 – соответственно окна подвода и отвода высокого давления умножителя расхода; 7, 8 – соответственно окна отвода и подвода низкого давления умножителя расхода; КОД1 – детандер-компрессор; КОД2 – умножитель расхода; ЦВ – циркуляционный вентилятор; ПВ1, ПВ2 – соответственно продувочные вентиляторы КОД1 и КОД2; ОВ – охладитель воздуха; НВ – нагреватель воздуха

Сжатый в КОД2 воздух через окно 6 под действием перепада давления, создаваемого циркуляционным вентилятором ЦВ, направляется в охлаждающий радиатор ОВ и далее подводится к окну 1 КОД1.

Давление сжатого в КОД2 воздуха и, следовательно, степень его расширения и глубина охлаждения в КОД1 зависят от уровня подогрева потока в источнике подвода теплоты НВ, повышаясь с увеличением последней.

Более высокий к.п.д. при увеличении глубины охлаждения обеспечивает ВХУ КОД с регенерацией.

В устройстве, показанном на рис. 4, воздух из холодильной камеры посредством специального вентилятора ПВ1 направляется к регенерационному теплообменнику ТА₁, благодаря которому осуществляется дополнительное охлаждение воздуха, расширяющегося в КОД1. Далее воздух, частично подогретый в регенераторе ТА₁, используется в качестве сжимаемой среды, подводимой в КОД1 через окно 4.

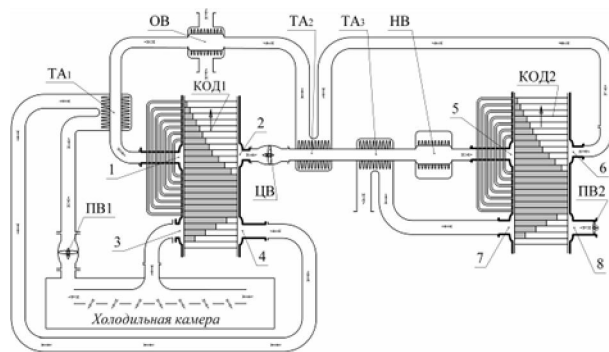


Рис. 4. Принципиальная схема воздушной холодильной установки на базе КОД с регенерацией.

ТА₁, ТА₂, ТА₃ – утилизационные теплообменники

Остаточная температура расширенного в КОД2 воздуха, отводимого через окно 7, а также остаточная температура сжатого в КОД2 воздуха, отводимого через окно 6, используется для предварительного подогрева нагнетаемого КОД1 воздуха посредством утилизационных теплообменников ТА₂ и ТА₃.

Основным потребителем механической энергии в рассмотренных устройствах (рис. 3, 4) является циркуляционный вентилятор ЦВ, обеспечивающий необходимый перепад давлений в линиях высокого давления двух КОД. Причем с увеличением общего перепада давлений, создаваемого циркуляционным насосом, скорость течения потоков в линиях высокого давления КОД1 и КОД2 и, следовательно, производительность холодильной установки возрастают.

Основные показатели работы ВХУ КОД с различной глубиной охлаждения представлены в таблицах 1 – 2.

Таблица 1. ВХУ КОД для низкотемпературного морозильника длительного хранения пищевых продуктов

Параметр	Значение
Хладопроизводительность, кВт	6
Температура в холодильной камере, °С	-20
Температура подаваемого в холодильную камеру воздуха, °С	-60
Объемный расход воздуха, м ³ /мин	6,5
Суммарная электрическая мощность приводов вентиляторов и роторов КОД, кВт	0,7
Количество подводимой теплоты, кДж/с	18,4
Габаритные размеры КОД (длина x диаметр), м	0,23 x 0,35

Таблица 2. ВХУ КОД среднетемпературной заморозки морепродуктов

Параметр	Значение
Хладопроизводительность, кВт	30
Температура в холодильной камере, °С	-40
Температура подаваемого в холодильную камеру воздуха, °С	-86
Объемный расход воздуха, м ³ /час	6010
Суммарная электрическая мощность приводов вентиляторов и роторов КОД, кВт	4,7
Количество подводимой теплоты, кДж/с	162

Анализ полученных результатов в сопоставлении с известными характеристиками работы ВХУ с

турбодетандером или волновым обменником давления показывает более высокую энергетическую эффективность рабочего цикла ВХУ КОД. Главным энергетическим источником работы ВХУ КОД является тепловая энергия, стоимость которой, особенно в условиях автономной эксплуатации установки (с учетом потерь преобразования теплоты сгорания топлива в теплосиловой установке и электрогенераторе), значительно ниже стоимости механической или электрической энергии.

В настоящее время продолжают работы по дальнейшему повышению эффективного к.п.д. представленной и перспективных схем ВХУ КОД, прежде всего, за счет оптимизации степени регенерации теплоты в различных контурах установки.

Заключение

С учетом более низкой стоимости тепловой энергии относительно механической и электрической, особенно в условиях автономной эксплуатации установки, рабочий цикл ВХУ КОД позволяет реализовать существенно более высокие по сравнению с традиционными схемами ВХУ экономические показатели производства низкотемпературного холода.

Более подробная информация может быть получена при непосредственно контакте с авторами. Тел. +38 (066) 212 80 77, e-mail: ljangar@rambler.ru.

Список литературы:

1. Крайнюк А.И., Сторчеус Ю.В. Системы газодинамического наддува. Монография. – Луганск: Изд-во Восточноукр.гос.ун-та, 2000. –224с.
2. Каскадний обмінник тиску. Патент України №77261А, МПК7 F 02 В 33/00/ Крайнюк О.І., Крайнюк А.О. - №20040806986; Заявл. 21.08.2004; Опубл. 15.11.2006, Бюл.№11.