

УДК 621.43

А.И. КРАЙНЮК, С.В. АЛЕКСЕЕВ, А.С. КОВТУН

*Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Луганск, Украина***РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ НАДДУВА КАСКАДНОГО ОБМЕНА ДАВЛЕНИЯ С ГЛУБОКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА**

Рассмотрены особенности организации рабочего процесса системы наддува каскадного обмена давления с глубоким охлаждением наддувочного воздуха. Приведены результаты испытаний опытного образца системы наддува на безмоторном стенде. Выявлена закономерность усиления эффекта охлаждения наддувочного воздуха при повышении нагрузочного режима комбинированного двигателя. Показана способность системы наддува обеспечить высокий уровень наддува при одновременном охлаждении наддувочного воздуха до температуры ниже окружающей среды без привлечения дополнительной механической энергии на осуществление холодильного цикла

Ключевые слова: каскадный обменник давления, турбодетандер, наддув, глубокое охлаждение, обмен энергией, каскадное сжатие, остаточное давление, предварительное сжатие, сжимающий газ.

Введение

Качественно новые показатели двигателя транспортной установки или специальной техники могут быть достигнуты применением в качестве основного агрегата системы наддува каскадного обменника давлением (КОД). КОД представляет собой принципиально новую разновидность нагнетательных устройств, основанных на прямом обмене энергии между сжимающей и сжимаемой средами.

Основные преимущества каскадных обменников относительно турбокомпрессоров и волновых обменников давлением (ВОД) системы наддува «Сотрпех» базируются на высокой (до 84...87%) энергетической эффективности рабочего процесса КОД и его способности сохранять приемлемые показатели наддува при удалении эксплуатационного режима от расчетных условий [1 – 3].

Высокая скорость и энергетическая эффективность прямого обмена давлением обуславливают высокое качество переходных процессов и удовлетворительное воздухообеспечение по скоростной характеристике работы двигателя

Замечательная особенность рабочего цикла КОД заключается в незначительном влиянии неполноты вытеснения сжатого воздуха из ячеек ротора (эффекта так называемого «мертвого объема») на к.п.д. обменника.

Немаловажным эксплуатационным преимуществом агрегатов КОД по отношению к волновым обменникам является существенно меньшая восприимчивость к отклонению частоты вращения ротора от значений настройки на определенные режимы работы двигателя (рис. 1).

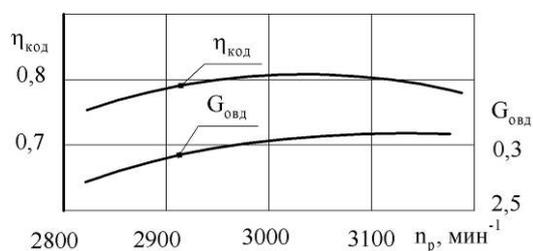


Рис. 1. Зависимость к.п.д. КОД ($\eta_{\text{код}}$) и расхода сжатого воздуха $G_{\text{овд}}$ от частоты вращения ротора n_p при фиксированных параметрах сжимающей среды ($P_g=205$ кПа, $T_g=700\text{K}$) и неизменном давлении сжимаемого воздуха ($P_k=190$ кПа)

Результаты исследований

Энергетическая эффективность рабочего цикла КОД проявляется в значительном превышении расхода сжимаемого воздуха относительно сжимающей среды, тем в большей степени, чем выше температура последней.

Испытания ряда опытных образцов КОД (рис. 2) показали, что уже при температуре сжимающей среды 700К на режиме наддува $P_k=205$ кПа расход сжимаемого воздуха в 1,8 раза превышает расход сжимающей среды. Данное свойство «умножения расхода» позволяет не только реализовать практически любую требуемую внешнюю характеристику наддува, но также осуществить глубокое охлаждение наддувочного воздуха путем детандерного расширения избытка нагнетаемого в КОД воздуха до температуры ниже окружающей среды с последующим его использованием в качестве хладагента второй ступени охладителя воздушного заряда [4]. Схема такого устройства показана на рис. 3.

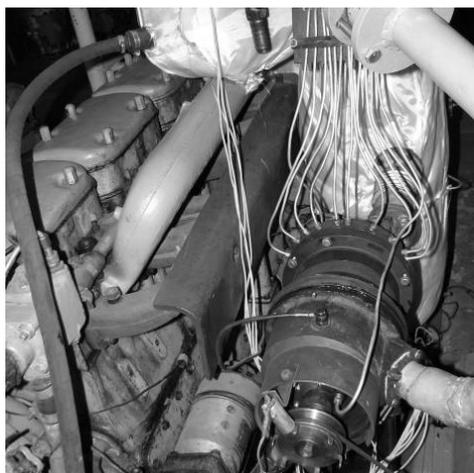


Рис. 2. Стенд моторных испытаний КОД

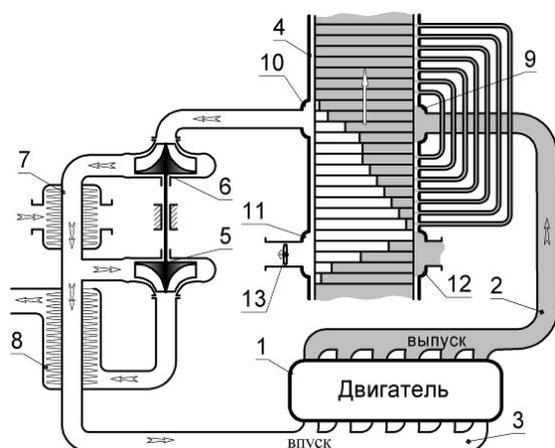


Рис. 3. Система наддува с глубоким охлаждением наддувочного воздуха (СНГО):

- 1 – ДВС; 2 – выпускной коллектор; 3 – впускной коллектор; 4 – КОД; 5 – турбодетандер;
- 6 – вытеснительный вентилятор;
- 7 – охладитель наддувочного воздуха;
- 8 – охладитель наддувочного воздуха (глубокого охлаждения наддувочного воздуха); 9 – окно подвода высокого давления (ПВД);
- 10 – окно отвода высокого давления (ОВД);
- 11 – окно подвода низкого давления (ПНД);
- 12 – окно отвода низкого давления (ОНД);
- 13 – продувочный вентилятор

Система наддува работает следующим образом. Отработавшие газы двигателя 1 из выпускного коллектора 2 через окно 9 ПВД направляются в КОД 4, где в результате рабочего процесса сжимают воздух, поступающий в КОД через окно ПНД. Отдавший значительную часть потенциальной энергии горячий газ с небольшим остаточным давлением отводится через окно 12 ОНД в окружающую среду, а сжатый воздух через окно 10 ОВД поступает в вытеснительный вентилятор компрессор 6, где осуществляется его дополнительное сжатие, и затем направляется в охладитель 7, где охлаждается до температу-

ры близкой к температуре окружающей среды. На выходе из охладителя воздух разделяется на два потока, один из которых подвергается глубокому охлаждению в холодильнике 8 и далее направляется в двигатель 1, осуществляя его наддув. Другой поток (избыточная часть нагнетаемого КОД воздуха) поступает в турбодетандер 6, где расширяется до температуры ниже окружающей среды, а затем используется в качестве низкотемпературного хладагента в охладитель второй ступени.

Работа расширения избыточной части нагнетаемого КОД воздуха является источником механической энергии привода вытеснительного вентилятора, создающего необходимый для эффективной продувки цилиндров перепад давления между впускным и выпускным коллектором. В виду незначительной степени повышения давления в вытеснительном вентиляторе ($\lambda_k = 1,08 \dots 1,15$) последний не оказывает существенного влияния на характеристику воздухообеспечения двигателя, но устраняет недостатки простейшей системы наддува с КОД – некоторое превышение противодавления выпуску газов из цилиндров уровня давления наддува.

Предварительные испытания рассмотренной системы наддува на базе двигателя 6ЧН12/14 подтвердили ее способность обеспечить высокоэффективный наддув и охлаждение наддувочного воздуха ниже температуры окружающей среды без привлечения дополнительной механической энергии на осуществление холодильного цикла во всем диапазоне скоростных режимов двигателя. Причем при давлении наддува 230 кПа на режиме $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ расход избыточного воздуха составлял 43% от общего расхода отработавших газов, что обуславливает резерв повышения давления наддува. Дальнейшее форсирование дизеля наддувом на моторном стенде было приостановлено из-за опасения разрушения деталей цилиндро-поршневой группы.

По сравнению со штатной системой наддува на базе турбокомпрессора ТКР-11 применение СНГО КОД позволило снизить удельный эффективный расход топлива на номинальном режиме работы на 10% и повысить эффективную мощность на 36%. Особенно заметен рост мощностных показателей в области низких частот вращения коленчатого вала. На режиме $n=800 \text{ мин}^{-1}$, благодаря высокому уровню наддува и охлаждению воздушного заряда мощность двигателя с СНГО превысила базовый показатель на 65%.

Для оценки потенциальных возможностей СНГО КОД и выявления количественного влияния размерных и регулировочных параметров системы на показатели наддува развернутые испытания опытного образца проводились на безмоторном стенде, схема которого представлена на рис. 4.

Анализ полученных зависимостей показывает, что увеличение температуры сжимающей среды T_g , характеризующей уровень нагрузочного режима, сопровождается улучшением всех показателей работы системы наддува. Повышение давлений рабочих сред P_s и P_g по мере роста T_g связано с фактором «умножения расхода» в КОД, обуславливающим увеличение относительного G_k/G_g и абсолютного G_k расходов сжатого воздуха. При этом повышение давлений наддува P_s сопровождается усилением охлаждения наддувочного воздуха.

Например, в СНГО КОД с исходным сопловым аппаратом детандера с увеличением температуры сжимающей среды T_g с 550 до 800 К отношение расходов сжимаемой и сжимающей сред в каскадном обменнике (G_k/G_g) увеличивается на 14%. В результате – давление наддува P_s , повышается с 200 кПа по 263 кПа, а температура наддувочного воздуха T_s снижается с 39 °С по 5 °С. Усиление охлаждающего эффекта при повышении T_g обусловлено двумя факторами: 1-снижением температуры хладагента $T_{х2}$ вследствие увеличения степени расширения воздуха в детандере; 2-повышением расхода хладагента G_T в холодильнике второй ступени.

Помимо отмеченного, при повышении T_g , вследствие увеличения расхода воздуха в турбодетандере и связанного с этим повышения частоты вращения вытеснительного вентилятора 9 (рис. 4) увеличивается отношение P_s/P_g . При работе СНГО КОД в составе дизеля такая закономерность способствует улучшению продувки цилиндров двигателя и снижению работы насосных ходов на высоконагруженных режимах.

Основным регулировочным параметром оказывающим влияние на общую напорность системы является площадь сечения соплового аппарата детандера. Посредством изменения размеров соплового аппарата детандера регулируется количество пропускаемого через детандер воздуха G_T и, таким образом, осуществляется изменение уровня форсирования дизеля наддувом. Вместе с тем, как видно из рис. 5, повышение давления наддува P_s путем уменьшения проходного сечения соплового аппарата турбины не сопровождается значительным снижением охлаждающей способности системы, несмотря на уменьшение расхода хладагента (G_T).

Применение системы наддува КОД с глубоким охлаждением наддувочного воздуха позволяет значительно повысить уровень форсирования двигателя наддувом и снизить теплонапряженность его деталей.

Высокая нагрузочная адаптивность рассматриваемой системы заключается в том, что именно на режимах повышенных нагрузок, где возрастает необходимость в снижении теплонапряженности цилиндрико-поршневой группы и головки цилиндров имеет место усиление охлаждения наддувочного воздуха и улучшение условий продувки цилиндров.

Наиболее полно потенциальные возможности СНГО КОД могут быть востребованы в высокофорсированных двигателях дорожно-строительной и специальной техники, работающей в широком диапазоне часто изменяющихся режимов в тяжелых эксплуатационных условиях.

Литература

1. Ключ О.В. *The principle organization of work process unit of cascade compression and its application / О.В. Ключ, А.И. Крайнюк, С.В. Алексеев // Scientific journals Maritime University of Szczecin. Szczecin. – 2008. – 14 (86). – С. 25-29.*
2. Система наддува транспортного ДВС с каскадным обменником давления / А.И. Крайнюк, А.А. Крайнюк, С.В. Алексеев, М.А. Брянцев // *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля. – Луганськ, 2008. – Ч. 2, № 7 (125). – С. 197-200.*
3. Крайнюк А.И. Особенности рабочего процесса каскадного обменника давления / А.И. Крайнюк, С.В. Алексеев, М.А. Брянцев // *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля. – Луганськ, 2005. – № 8 (90). – С. 176-179.*
4. Моделирование рабочего процесса газовой холодильной машины с каскадным обменником давления рефрижераторной секции железнодорожного транспорта / А.И. Крайнюк, А.А. Крайнюк, В.И. Кашуба, М.А. Брянцев, С.В. Алексеев // *Вісник Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля. – Луганськ, 2008. – Ч. 1, № 5 (123). – С. 118-124.*
5. Крайнюк А.И. Система наддува ДВС с глубоким охлаждением наддувочного воздуха / А.И. Крайнюк, С.В. Алексеев, А.А. Крайнюк // *Двигатели внутреннего сгорания: научно-технический журнал. – 2009. – № 1. – С. 57-62.*

Поступила в редакцию 23.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.П. Кравченко, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск, Украина.

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ СИСТЕМИ НАДДУВУ КАСКАДНОГО ОБМІНУ ТИСКУ
З ГЛУБОКИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ***О.І. Крайнюк, С.В. Алексеев, О.С. Ковтун*

Розглянуто особливості організації робочого процесу системи наддуву каскадного обміну тиску з глибоким охолодженням наддувного повітря. Приведені результати випробувань дослідного зразка системи наддуву на безмоторному стенді. Виявлена закономірність посилення ефекту охолодження наддувного повітря при підвищенні режиму навантаження комбінованого двигуна. Показана здатність системи наддуву забезпечити високий рівень наддуву при одночасному охолодженні наддувного повітря до температури нижчої за температуру навколишнього середовища без залучення додаткової механічної енергії на здійснення холодильного циклу.

Ключові слова: каскадний обмінник тиску, турбодетандер, наддув, глибоке охолодження, обмін енергією, каскадне стиснення, залишковий тиск, попереднє стиснення, стискаючий газ.

**RESULTS OF TESTS OF SYSTEM OF SUPERCHARGE OF CASCADE EXCHANGE
OF PRESSURE WITH DEEP COOLING OF AIR***A.I. Krajniuk, S.V. Alekseev, A.S. Kovtun*

The working process organization of a cascade pressure exchange with deep cooling charge air has been described. Tests results of a supercharge system prototype at the motorless stand has been resulted. Increasing law of cooling effect charge air at rising of a loading mode of the combined engine has been revealed. Supercharge system's ability to provide high level of boosting has been shown. Thus charge air is cooled below ambient temperature without bringing in of additional mechanical energy on realization of refrigeration cycle.

Key words: cascade exchanger of pressure, turbo-detander, forced aspiration, deep cooling, exchange of energy, cascade compression, residual pressure, preliminary compression, compressing gas.

Крайнюк Александр Иванович – д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедрой Двигатели внутреннего сгорания Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, Луганск, Украина, e-mail: ljangar@rambler.ru.

Алексеев Сергей Викторович – ассистент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, Луганск, Украина, e-mail: alexsv@mail.dsip.net.

Ковтун Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, Луганск, Украина.