

УДК 621.577

В.В. КАПУСТИН¹, А.А. АНДРЕЕВ², Д.В. КОНОВАЛОВ², Н.И. РАДЧЕНКО²¹*Севастопольский национальный технический университет, Украина*²*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина*

ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА СУДОВЫХ ДВС

На основе анализа результатов расчета рациональных параметров промежуточного охлаждения наддувочного воздуха ДВС обоснованы схемные решения тригенерационных контуров на базе теплоиспользующих эжекторных холодильных машин.

наддувочный воздух, промежуточное охлаждение, тригенерационный контур, низкокипящее рабочее тело, теплоиспользующая холодильная машина

Анализ проблемы и постановка задачи исследования

Одним из перспективных направлений повышения эффективности судовых ДВС является утилизация теплоты их вторичных энергоресурсов (ВЭР): теплоты, отводимой с продуктами сгорания, охлаждающей водой и от наддувочного воздуха. На долю тепловых потерь с наддувочным воздухом приходится 7...10% теплоты сгорания топлива. В высокоэкономичных длинноходных малооборотных дизелях (МОД) температура наддувочного воздуха достигает 240...260 °С. Традиционно утилизация его теплоты предполагает получение водяного пара и нагрев воды в 3–4-секционных охладителях наддувочного воздуха (ОНВ) [1]. В этом случае имеет место комбинированная выработка механической и тепловой энергии, т.е. когенерация. Однако из-за снижения температуры наддувочного воздуха на частичных нагрузках двигателя возможности использование его теплоты для производства водяного пара резко сокращаются или исключаются вообще. С другой стороны, на транспортных судах на ходовых режимах мощности теплопроизводящих когенерационных контуров превосходят потребности судна в тепловой энергии. В условиях отсутствия потребителей избыточной

тепловой энергии на транспортных судах и при недостаточно высокой для работы пароводяных теплоиспользующих контуров температуре наддувочного воздуха его теплоту целесообразно задействовать для выработки холода в тригенерационных установках. Вырабатываемый при этом холод можно применять как для предварительного охлаждения наружного воздуха на входе, так и для промежуточного охлаждения наддувочного воздуха. Благодаря глубокому промежуточному охлаждению наддувочного воздуха можно повысить эффективность ДВС, нивелируя отрицательное влияние повышения температуры наружного воздуха. Так, известно, что каждые 10 °С повышения температуры наружного воздуха вызывают снижение КПД ДВС на 0,5...0,7% и мощности на 5...10% [2, 3].

Основу тригенерационных контуров, в которых происходит трансформация теплоты ВЭР в холод, составляют теплоиспользующие холодильные машины (ТХМ). Абсорбционным холодильным машинам свойственны повышенные габариты (соответственно аэродинамическое сопротивление), и целесообразность их включения в воздушный тракт ДВС весьма проблематична. Конструктивной простотой и надежностью в эксплуатации отличаются ТХМ струйного – эжекторного типа, в которых эжектор

выполняет функцию компрессора [4 – 6]. Включение таких ТХМ в дизельные установки не приведет к заметному усложнению последних. В ТХМ используются низкокипящие рабочие тела (НРТ), что позволяет утилизировать теплоту сравнительно низкого температурного уровня, что особенно важно для режимов частичной нагрузки ДВС.

Целью выполненного исследования является определение рациональных параметров тригенерационных контуров судовых ДВС, обеспечивающих максимальное приращение КПД и мощности двигателей за счет охлаждения наддувочного воздуха.

Анализ параметров тригенерационных контуров судовых ДВС

Теплоиспользующие эжекторные холодильные машины в наибольшей степени отвечают двойному функциональному назначению наддувочного воздуха как источника теплоты, так и объекта охлаждения. При этом генератор пара НРТ высокого давления устанавливается на высокотемпературном участке наддувочного воздушного тракта (перед водяным охладителем наддувочного воздуха), а испаритель НРТ низкого давления – для более глубокого охлаждения наддувочного воздуха (рис. 1) или же предварительного охлаждения воздуха на всасывании компрессора.

Компрессоры турбонаддувочных агрегатов современных судовых ДВС имеют относительно высокие степени повышения давления $\pi_k = 2 \dots 4$. Традиционным способом сокращения работы сжатия в компрессоре является промежуточное охлаждение воздуха между ступенями сжатия. Обычно охлаждение наддувочного воздуха осуществляется забортной водой, охлаждающий потенциал которой ограничен или пресной водой, потенциал которой еще меньше. Глубокое охлаждение наддувочного воздуха позволяет нивелировать повышение температуры наружного воздуха на входе в турбоком-

прессор ДВС и увеличить массовый заряд цилиндров воздухом, что создает предпосылки для увеличения подачи топлива с соответствующим ростом цилиндровой мощности ДВС.

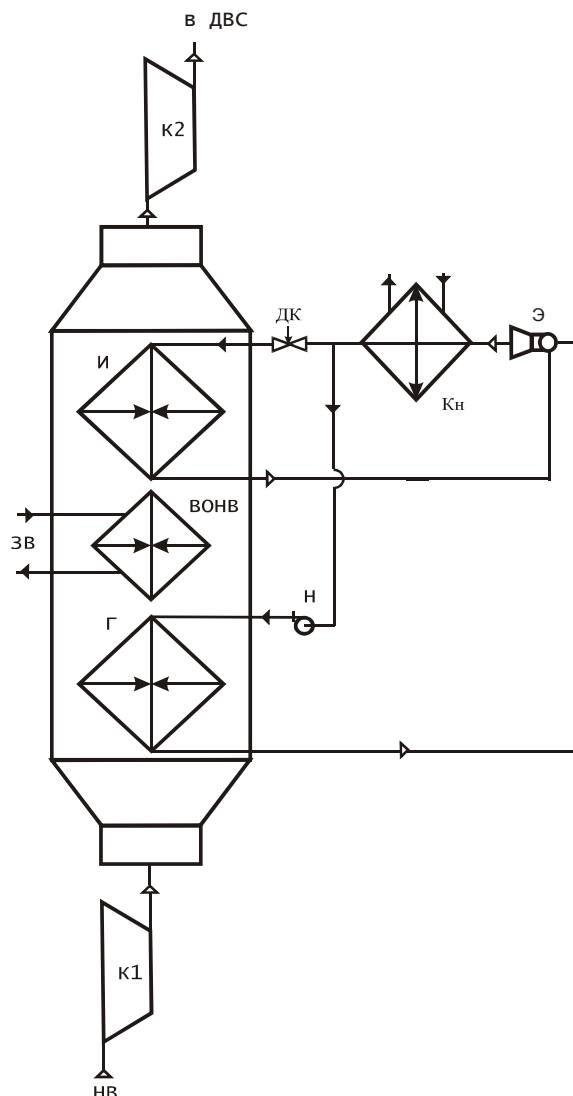


Рис. 1. Схема эжекторной тригенерационной системы охлаждения наддувочного воздуха ДВС: Г – генератор паров хладагента; Э – эжектор; Кн – конденсатор; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; И – испаритель (воздухоохладитель); К1, К2 – компрессоры первой и второй ступеней; ВОНВ – водяной охладитель наддувочного воздуха; НВ – наружный воздух; ЗВ – забортная вода

С целью определения рациональных параметров наддувочного воздуха при промежуточном его охлаждении были выполнены расчеты зависимости мощности наддувочного турбокомпрессора от отношения π_{k1}/π_{k2} степеней сжатия компрессорных

ступеней низкого $\pi_{к1}$ и высокого $\pi_{к2}$ давления при разных температурах $t_{по2}$ сжатого воздуха после промежуточного охладителя (ПО) и температурах $t_{вх}$ наружного воздуха на входе.

За базовый вариант принят одноступенчатый турбокомпрессор без ПО со степенью сжатия 4.

Результаты расчетов в виде зависимости отношения $N_{по}/N$ мощностей двухступенчатого компрессора с промохлаждением $N_{по}$ и базового компрессора N при температурах $t_{по2} = 20, 40, 60$ и 80 °C и воздуха на входе в компрессор $t_{вх} = 40$ и 20 °C приведены на рис. 2.

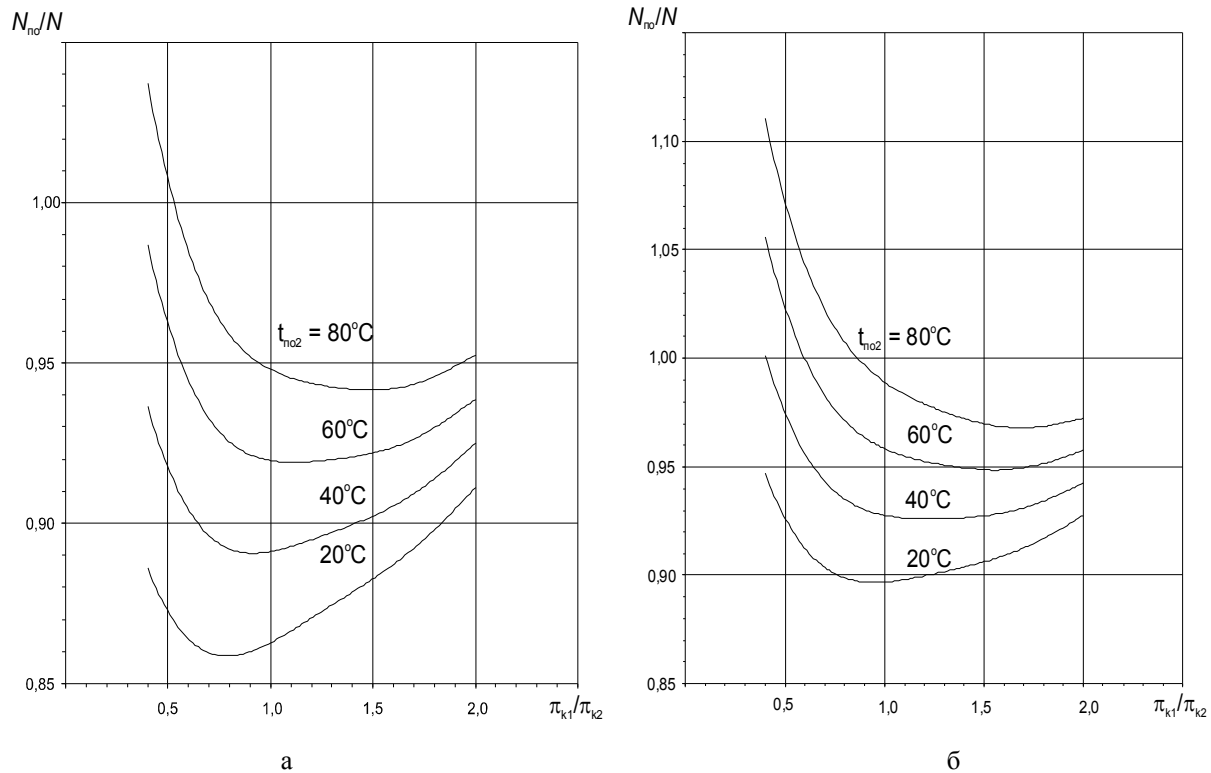


Рис. 2. Зависимости отношения мощностей $N_{по}/N$ компрессоров от отношения степеней сжатия $\pi_{к1}/\pi_{к2}$ компрессорных ступеней:
а – $t_{вх} = 40$ °C; б – $t_{вх} = 20$ °C

Как видно из рис. 2, для ДВС с промежуточным охлаждением существует рациональная величина отношения степеней сжатия $\pi_{к1}/\pi_{к2}$, которая обеспечивает сокращение затрат мощности наддувочного агрегата на 5...15% и находится в диапазоне 0,8...1,5, причем с уменьшением $t_{по2}$ (увеличением глубины охлаждения) экстремумы снижаются и смещаются в сторону больших величин $\pi_{к1}/\pi_{к2}$. Наибольшее сокращение мощности (свыше 12...15%) достигается при глубоком охлаждении сжатого воздуха к $t_{по2} = 20...40$ °C, что возможно лишь при применении машинного холода. В таком случае компоновка

эжекторной ТХМ на НРТ предусматривает применение ее генератора пара НРТ высокого давления (силового контура ТХМ) для использования относительно высокотемпературного теплового потенциала наддувочного воздуха, а ее испарителя – для глубокого охлаждения наддувочного воздуха до температуры $t_{по2} = 20...40$ °C.

При нехватке холода возможно параллельное подключение дополнительного генератора пара, использующего теплоту отходящих газов ДВС, т.е. параллельная работа двух генераторов ТХМ на один испаритель.

Из рис. 2, б видно, что сокращение потребляемой мощности компрессорного агрегата с переходом на промежуточное охлаждение весьма существенно даже при достаточно низкой температуре воздуха на входе, что свидетельствует о целесообразности предварительного охлаждения воздуха, то есть комбинированного охлаждения циклового воздуха. Таким образом, рациональную компоновку тригенерационного контура на базе ТХМ (место включения генератора пара и испарителя ТХМ в газоздушный тракт ДВС) следует осуществлять, исходя из оптимального отношения степеней повышения давления $\pi_{к1}/\pi_{к2}$, обеспечивающего максимальное со-

кращение потребляемой мощности наддувочного агрегата.

При проектировании теплообменников ТХМ (генератора паров НРТ высокого давления и испарителя НРТ низкого давления) необходимо знать перепады температур по сжатому воздуху

$$\Delta t_{\text{ПО}} = t_{\text{ПО1}} - t_{\text{ПО2}},$$

которые для рассмотренных условий приведены на рис. 3 вместе с температурой $t_{\text{ПО1}}$ сжатого воздуха на входе в ПО (после компрессора первой ступени).

Как видно, в зависимости от глубины охлаждения они изменяются в диапазоне значений

$$\Delta t_{\text{ПО}} = 50 \dots 100 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

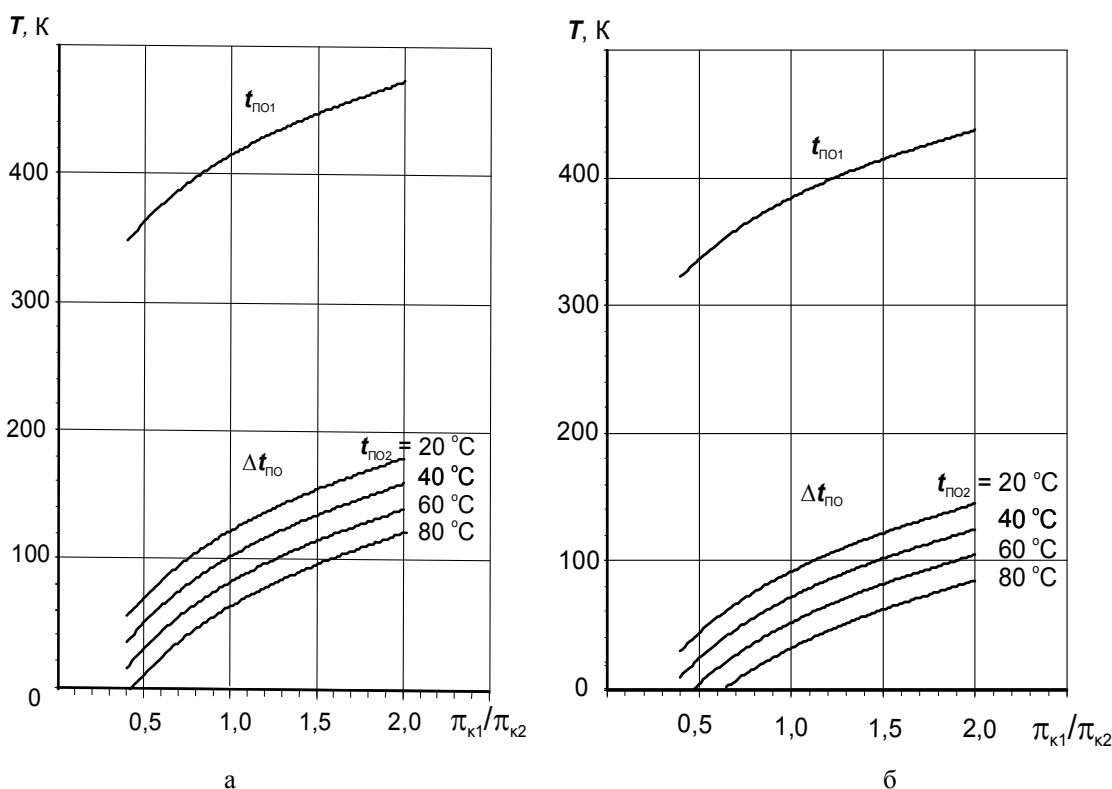


Рис. 3. Зависимости температуры $t_{\text{ПО1}}$ воздуха на входе в ПО и разности температур $\Delta t_{\text{ПО}}$ воздуха в ПО от отношения $\pi_{к1}/\pi_{к2}$ степеней сжатия компрессорных ступеней при температурах наружного воздуха на входе $t_{\text{вх}} = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ (а) и $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ (б): степени сжатия компрессорных ступеней $\pi_{к1}$ – низкого и $\pi_{к2}$ – высокого давлений; $t_{\text{ПО2}}$ – температура сжатого воздуха после ПО

Следует отметить, что для снижения температуры наддувочного воздуха в промежуточном диапазоне значений $40 \dots 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ нецелесообразно задействовать дефицитный низкотемпературный

холод, производимый в ТХМ. Поэтому глубокому охлаждению наддувочного воздуха в испарителе ТХМ должно предшествовать его охлаждение заборной водой (рис. 1). Аналогом такого трехсту-

пенчатого промежуточного охлаждения воздуха являются трехсекционные промежуточные охладители – производители тепловой энергии в виде пара и нагретой воды [1].

В результате расчетов, установлено, что применение тригенерационной системы промежуточного охлаждения на базе эжекторной холодильной машины, использующей теплоту наддувочного воздуха с температурой 220...240 °С, позволяет снизить его температуру примерно на 30 °С ниже, чем это возможно в случае охлаждения забортной водой, и увеличить за счет этого КПД ДВС на 2...3%.

Выводы

1. Предложены схемные решения тригенерационных систем промежуточного охлаждения воздуха судовых ДВС на базе эжекторных холодильных машин, использующих теплоту наддувочного воздуха.

2. Установлено, что применение тригенерационных систем позволяет снизить температуру наддувочного примерно на 30 °С ниже, чем в случае охлаждения забортной водой, и увеличить за счет этого КПД ДВС на 2...3 %.

3. Определены рациональные параметры промежуточного охлаждения наддувочного воздуха ДВС.

Литература

1. Артемов Г.А., Горбов В.М. Суднові енергетичні установки. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – 356 с.

2. Абоleshкин С.Е., Балыхин Ю.В. Экспериментальная проверка стабильности интегрального показателя технического состояния главного судового двигателя // Судовые энергетические установки: Научн.-техн. сб. – 2004. – Вып. 11. – С. 132-139.

3. Колпакчи Э.М., Кохановский А.И. Особенности технической эксплуатации судовой энергетической установки пассажирского судна, работающего в условиях стесненного фарватера // Судовые энергетические установки. – 2004. – Вып. 11. – С. 23-33.

4. Захаров В.Ю. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины. – С.-Пб.: Судостроение, 1994. – 504 с.

5. Петренко В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование эжекторной холодильной машины в режиме кондиционирования воздуха // Холодильная техника и технология. – 2001. – № 2 (71). – С. 12-18.

6. Петренко В.А. Принцип выбора рабочего вещества для эжекторной холодильной машины // Холодильная техника и технология. – 2001. – № 1 (70). – С. 16-21.

Поступила в редакцию 26.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Г. Ивановский, Одесский национальный морской университет, Одесса.