

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА ДВС

А. Н. Радченко, канд. техн. наук, с.н.с.,
А. А. Андреев, аспирант

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Выполнено сравнение мощности газовой турбины, утилизирующей энергию продуктов сгорания ДВС, и мощности, потребляемой наддувочным компрессором. Проанализировано эффективность использования избыточной тепловой энергии продуктов сгорания для охлаждения наддувочного воздуха. Предложено схемные решения эжекторных теплоиспользующих систем охлаждения наддувочного воздуха ДВС.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, продукты сгорания, утилизация, наддувочный воздух, теплоиспользующая система охлаждения.

Анотація. Виконано порівняння потужності газової турбіни, що утилізує енергію продуктів згорання ДВЗ, і потужності, яку споживає наддувний компресор. Проаналізовано ефективність використання надлишкової теплової енергії продуктів згорання для охолодження наддувного повітря. Запропоновано схемні рішення ежекторних тепловикористовуючих систем охолодження наддувного повітря ДВЗ.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, продукти згорання, утилізація, наддувне повітря, тепловикористовуюча система охолодження

Abstract. A power output of gas turbine, recovering the energy of combustion products of ICE, was compared with the power, required by air charging compressor. The effectiveness of using the excessive thermal energy of combustion products for cooling charged air has been analyzed. The schemes of ejector waste heat recovery systems for cooling charged air of ICE were proposed.

Keywords: internal combustion engine, combustion products, utilization, charged air, waste heat recovery cooling system

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Совершенствование систем турбонаддува является одним из основных направлений в дизелестроении. Применение современных, с высоким КПД ($\eta_{тк} = 0,70 \dots 0,75$), турбокомпрессоров (ТК) [3] способствует образованию избытка энергии продуктов сгорания сверх необходимой для привода наддувочных компрессоров. Обычно избыточная энергия продуктов сгорания ис-

пользуется в дополнительной газовой турбине, устанавливаемой на байпасной линии основной турбины наддувочного ТК [5]. Из-за высокой стоимости применение таких турбокомпаундных систем (ТКС) экономически оправдано для крупных ДВС мощностью 20...60 МВт и выше. При этом срок их окупаемости составляет 5...10 лет [5]. К тому же эффективность ТКС, как и самих ДВС, существенно снижается с повышением температур наружного воздуха на входе ТК $t_{нв}$ и забортной воды $t_{зв}$ системы охлажде-

ния наддувочного воздуха [1, 2, 5]. Поэтому представляется целесообразной утилизация избыточной тепловой энергии продуктов сгорания в теплоиспользующих установках охлаждения наддувочного воздуха (ТУОНВ), обеспечивающих улучшение показателей ДВС при высоких $t_{нв}$ и $t_{зв}$.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — анализ эффективности использования избыточной теплоты продуктов сгорания ДВС для охлаждения наддувочного воздуха.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ ТЕПЛОТЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА

Оценка избытка мощности утилизационной турбины N_T над мощностью наддувочного компрессора N_K , необходимой для создания требуемого давления наддува, выполнена для мощностного ряда малооборотных дизелей (МОД) фирмы «Вяртсила Нью Зульцер» [4]. При этом учитывали зависимость КПД компрессора η_k от степени повышения давления π_k , а также температуры уходящих газов $t_{г1}$ на входе утилизационной турбины ТК от температуры окружающего воздуха $t_{ов}$ на входе компрессора ТК. Так, согласно данным фирм

«МАН – Бурмейстер и Вайн» и «Вяртсила Нью Зульцер» повышение температуры наружного воздуха на входе ТК на 10 °С вызывает возрастание температуры газов на выходе из ДВС на 16 °С [1, 2].

Как видно из рис. 1, для всего ряда мощностей N_e МОД «Вяртсила Нью Зульцер» имеет место резерв мощности ТК. При повышении мощности двигателя разница мощностей турбины и компрессора в абсолютных величинах увеличивается, тогда как в относительных — остается практически постоянной.

Представляется целесообразным использование избытка тепловой энергии уходящих газов в ТУОНВ, и в частности, эжекторного типа как конструктивно наиболее простой. Для этого необходимо часть газов направить мимо турбины ТК на ТУОНВ. Количество байпасируемого газа пропорционально избытку мощности турбины над мощностью компрессора. Оно зависит от температуры наддувочного воздуха на нагнетании компрессора, которая, в свою очередь, — от температуры окружающего воздуха $t_{нв}$ на его всасывании, и может составлять 20...30%. В качестве рабочего вещества эжекторной ТУОНВ применяют низкокипящие рабочие тела (НРТ).

Схема системы охлаждения наддувочного воздуха ДВС на базе эжекторной ТУ-

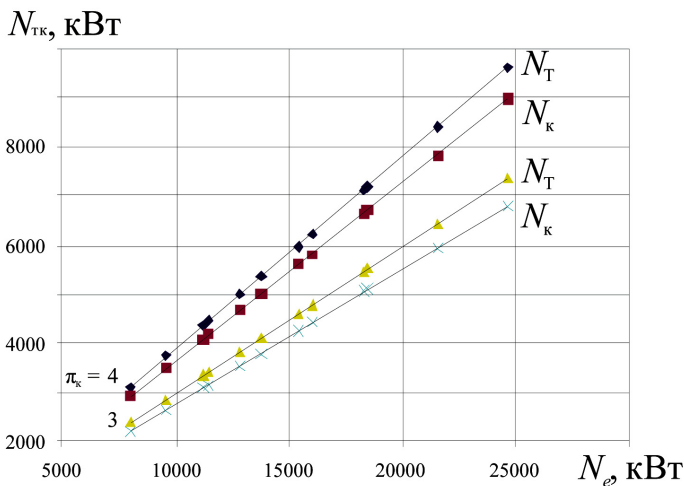


Рис. 1. Мощности утилизационной турбины N_T и наддувочного компрессора N_K в зависимости от мощности дизеля N_e при разной степени повышения давления π_k : \blacktriangle , \times — $\pi_k = 3$; \blacklozenge , \blacksquare — $\pi_k = 4$

ОНВ, утилізуючої теплоту избыточного количества уходящих газов, представлена на рис. 2. При этом в испарительной, высокотемпературной, секции генератора паров НРТ высокого давления используется теплота газов байпасной линии с температурой 350...400 °С и расходом 20...30 % общего количества газов после цилиндров двигателя. Нагрев жидкого НРТ, поступающего из конденсатора в генератор, от температуры конденсации t_k до температуры кипения t_r при высоком давлении происходит в низкотемпературной экономайзерной секции генератора за счет теплоты, отводимой от уходящих газов после утилизационного котла (УК) с температурой около 180 °С.

Теплоперепад, срабатываемый в испарительной секции генератора, небольшой, поскольку ограничен разностью температур газов на входе и выходе из нее (входе в УК) $t_{r1} - t_{r2} = 350 - 250 = 100$ °С, к тому же отнесенной к весьма малому расходу газов через байпас (около 20 % общего расхода).

Очевидно, что больший эффект можно получить при срабатывании в испарительной секции всего теплового потенциала избыточного количества уходящих газов: $t_{r1} - t_{r2} = 350 - 150 = 200$ °С (схема на рис. 3, а), где нижняя температура газов ограничена условием предотвращения сернистой коррозии материала экономайзерных поверхностей генератора ТУОНВ.

Значения удельной теплоты, приходящейся на единичный расход уходящих газов через байпасную линию и отведенной от газов q_r в генераторе эжекторной ТУОНВ и от наддувочного воздуха в испарителе ТУОНВ после ОНВ (удельной холодопроизводительности ТУОНВ) q_0 , снижения температуры Δt_b наддувочного воздуха, приходящегося также на единичный расход уходящих газов через байпасную линию, теплового коэффициента ТУОНВ ζ в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе t_r при температурах уходящих газов на входе генератора $t_{r1} = 350$ и 400 °С и на его выходе $t_{r2} = 150$ °С представлены на рис. 4. В качестве НРТ применен хладон R142В, температуры конденсации $t_k = 35$ °С и кипения $t_0 = 0$ °С.

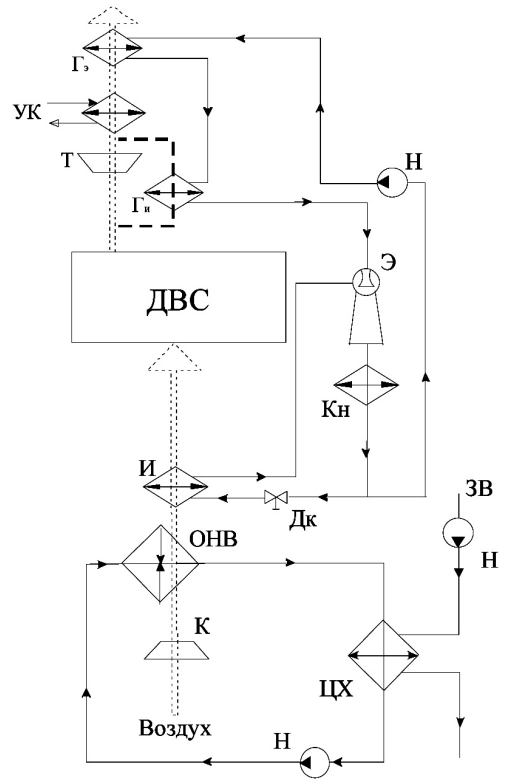


Рис. 2. Схема системы охлаждения наддувочного воздуха ДВС на базе эжекторной ТУОНВ: Т — турбина ТК; К — наддувочный компрессор; УК — утилизационный котел; ОНВ — охладитель наддувочного воздуха водяной; ЦХ — центральный холодильник; ЗВ — заборная вода; ТУОНВ: Г_в и Г_н — экономайзерная и испарительная секции генератора; Э — эжектор; К_н — конденсатор; Н — насос; Дк — дроссельный клапан; И — испаритель-воздухоохладитель

Тепловой коэффициент ζ представляет собой отношение $\zeta = \bar{q}_0 / \bar{q}_r$ и характеризует энергетическую эффективность ТУОНВ. Он возрастает с повышением температур кипения НРТ в генераторе t_r и испарителе t_0 и снижается с увеличением температуры конденсации НРТ t_k (температуры заборной воды, охлаждающей конденсатор ТУОНВ).

Чтобы выявить резервы повышения эффективности утилизации избыточной теплоты уходящих газов ДВС, проанализируем удельную тепловую нагрузку на генератор дифференцированно — отдельно удельные тепловые нагрузки на экономайзерную \bar{q}'_r и испарительную \bar{q}''_r секции, причем

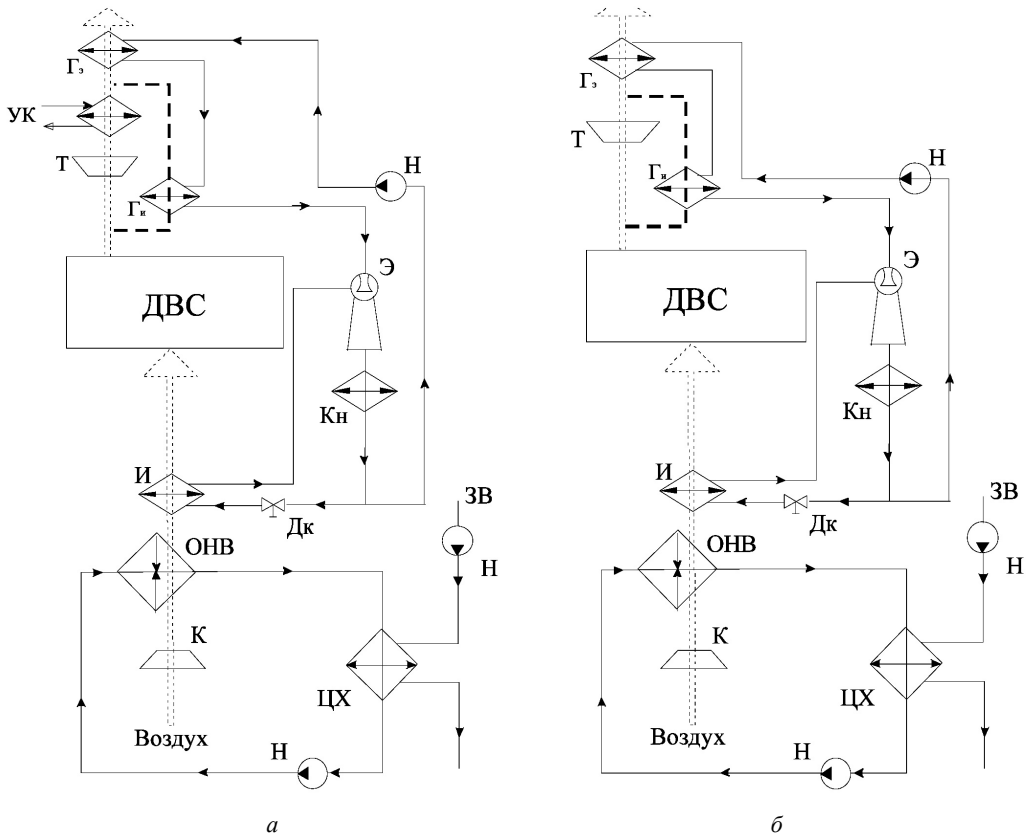


Рис. 3. Схемы систем охлаждения наддувочного воздуха ДВС на базе эжекторной ТУОНВ с испарительной секцией генератора на байпасной линии уходящих газов: *а* — экономайзерная секция после УК; *б* — экономайзерная секция после турбины ТК; Т — турбина ТК; К — наддувочный компрессор; ОНВ — охладитель наддувочного воздуха водяной; ЦХ — центральный холодильник; ЗВ — забортная вода; ТУОНВ: Γ_3 и Γ_4 — экономайзерная и испарительная секции генератора; Э — эжектор; Кн — конденсатор; Н — насос; ДК — дроссельный клапан; И — испаритель-воздухоохладитель

при условии, что генератор (обе его секции) установлен на байпасной линии (не показано на рисунках). Соотношение удельных тепловых нагрузок \bar{q}'_r и \bar{q}''_r экономайзерной и испарительной секций генератора, т.е. теплоты, необходимой для нагрева жидкости и ее испарения, определяется отношением удельных теплоты нагрева конденсата НРТ от температуры конденсации t_k до t_r и теплоты фазового перехода НРТ при температуре кипения t_p , т.е. температурами t_r и t_k . Для нагрева жидкости в экономайзере целесообразно использовать теплоту источника с более низкой температурой, чем для ее испарения.

Как видно, при неизменной удельной тепловой нагрузке на генератор ТУ-

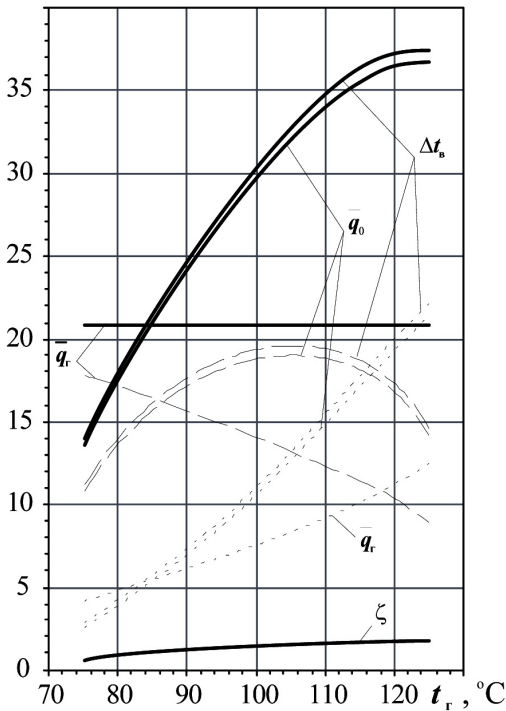
ОНВ, $\bar{q}_r = \text{const}$, возрастание теплового коэффициента ζ замедляющимся темпом с повышением t_r от 80 до 120°C обуславливает замедление увеличения удельной холодопроизводительности ТУОНВ \bar{q}_0 и прямо пропорционального ей снижения температуры охлаждаемого наддувочного воздуха в испарителе Δt_b — с достижением максимума при максимально допустимой (исходя из термической стойкости хладона R142B) температуре $t_r = 120^\circ\text{C}$. При этом снижение температуры наддувочного воздуха в испарителе, отнесенное к расходу уходящих газов через байпасную линию, составляет $\Delta t_b = 35\text{--}45^\circ\text{C}$ (при $t_{r1} = 350$ и 400°C соответственно), а величина Δt_b , отнесен-

ная к общему расходу газа весьма незначительная: $\Delta t_b = 7 \dots 9$ °C при 20 %-м расходе уходящих газов через байпасную линию и $\Delta t_b = 12 \dots 15$ °C при 30 %-м байпасе.

Обращает на себя внимание то, что при максимальных удельной холодопроизводительности \bar{q}_0 и снижении температуры Δt_b наддувочного воздуха в испарителе удельные тепловые нагрузки на обе секции \bar{q}'_r и \bar{q}''_r практически одинаковы (рис. 4). Это означает, что при разнице температур уходящих газов на входе и выходе из генератора, например $t_{r1} - t_{r2} = 350 - 150 = 200$ °C и случае, когда обе секции генератора размещены на байпас-

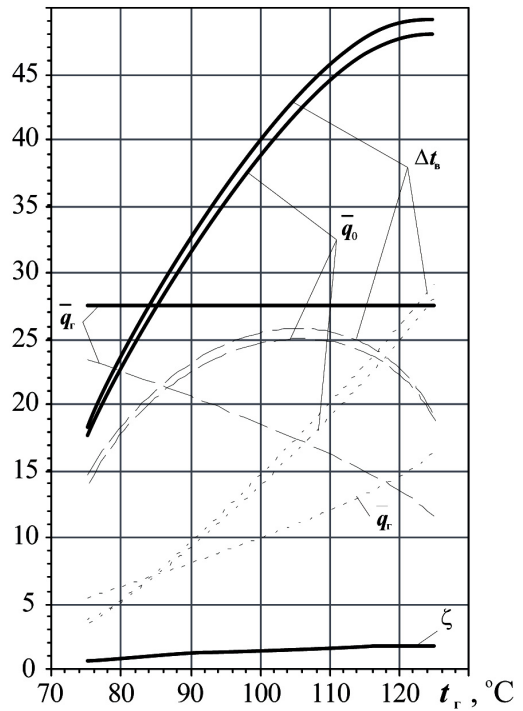
ной линии, ее половина срабатывается в низкотемпературной экономайзерной секции, причем при температурах газов от 150 °C на входе до 250 °C на выходе из нее, т. е. температурах, которые намного выше максимальной температуры нагрева конденсата t_f . Вполне очевидно, что весь диапазон повышенных температур 150...350 целесообразнее срабатывать в высокотемпературной испарительной секции, тогда как в низкотемпературной экономайзерной секции утилизировать теплоту более низкого температурного уровня, например суммарного потока уходящих газов после УК с температурой $t_{yrl} = 180$ °C,

$\Delta t_b, \text{ }^\circ\text{C}$
 $\zeta \cdot 10$
 $\bar{q}_r \cdot 10^{-1}, \text{ кВт/(кг/с)}$
 $\bar{q}_0, \text{ кВт/(кг/с)}$



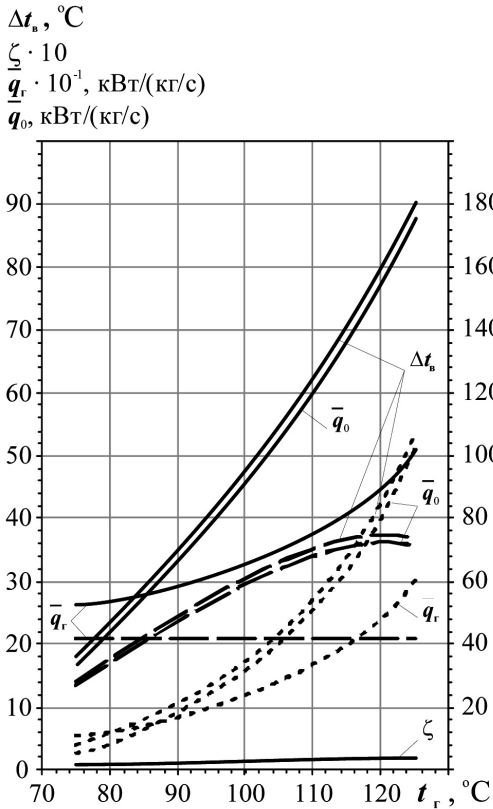
a

$\Delta t_b, \text{ }^\circ\text{C}$
 $\zeta \cdot 10$
 $\bar{q}_r \cdot 10^{-1}, \text{ кВт/(кг/с)}$
 $\bar{q}_0, \text{ кВт/(кг/с)}$

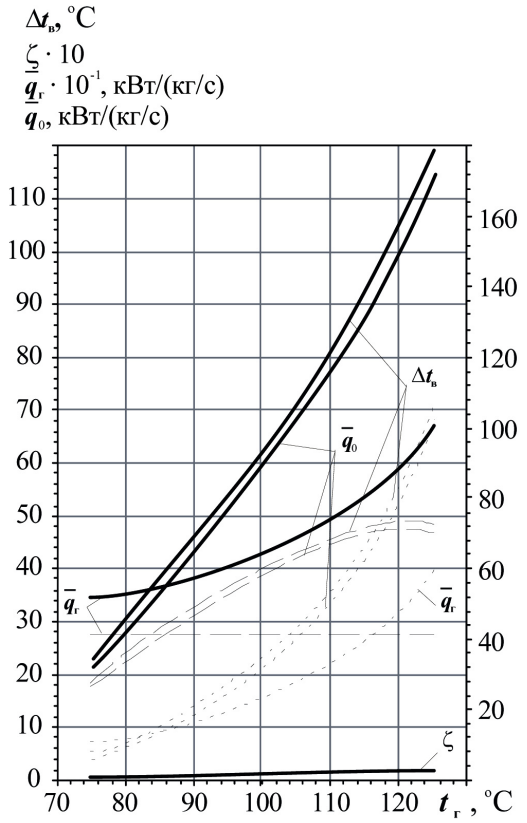


b

Рис. 4. Удельные значения, приходящиеся на единичный расход уходящих газов через байпасную линию, тепловой нагрузки на испаритель эжекторной ТУОНВ (удельная холодопроизводительность ТУОНВ) \bar{q}_0 и генератор \bar{q}_r , а также снижения температуры Δt_b наддувочного воздуха, приходящегося на единичный расход уходящих газов через байпасную линию, теплового коэффициента ТУОНВ ζ в зависимости от температуры кипения хладона R142В в генераторе t_r при температурах уходящих газов на входе генератора t_{r1} : a — $t_{r1} = 350$ °C; б — $t_{r1} = 400$ °C; — — за счет отвода теплоты генератором в целом, \bar{q}_r и \bar{q}_0 ; - - - - испарительной секцией, \bar{q}'_r и \bar{q}''_r ; — экономайзерной секцией, \bar{q}'_r и \bar{q}''_r



a



б

Рис. 5. Удельные значения, приходящиеся на единичный расход уходящих газов через байпасную линию, тепловой нагрузки на испаритель эжекторной ТУОНВ (удельная холодопроизводительность ТУОНВ) \bar{q}_0 и генератор \bar{q}_r , а также снижения температуры Δt_b наддувочного воздуха, приходящегося на единичный расход уходящих газов через байпасную линию, теплового коэффициента ТУОНВ ζ в зависимости от температуры кипения хладона R142B в генераторе t_r : а — $t_{r1} = 350$ °С; б — $t_{r1} = 400$ °С; — — за счет отвода теплоты генератором в целом, \bar{q}_r и \bar{q}_0 ; - - - - испарительной секцией, \bar{q}_r'' и \bar{q}_0'' ; ••••• — экономайзерной секцией, \bar{q}_r' и \bar{q}_0'

зато расходом, превышающим расход через байпас, в 5 раз (при 20 %-ном байпасе), чему соответствует схема на рис. 3, а.

Располагаемый теплоперепад газов после УК определяется разностью их температур $t_{гр1} - t_{гр2} = 180 - 150 = 30$ °С и эквивалентный теплосодержанию газов в байпасной линии (при 20 %-ном байпасе), соответствующему в 5 раз большей разности температур $30 \cdot 5 = 150$ °С, отнесенной к расходу газов через байпасную линию. Как видно, теплосодержание газов после УК составляет 75% от теплоперепада, срабатываемого в испа-

рительной секции генераторе на байпасной линии, т.е. дефицит теплоты в экономайзерной секции составляет 25% при $t_r = 120$ °С ($\bar{q}_r' \approx \bar{q}_r''$ на рис. 4) и полностью отсутствует при $t_r = 110$ °С ($\bar{q}_r' = 0,75 \bar{q}_r''$). Таким образом, утилизация теплоты уходящих газов байпасной линии и после УК обеспечивает увеличенные на 75% удельную холодопроизводительность \bar{q}_0 и соответственно снижение температуры воздуха в испарителе ТУОНВ: $\Delta t_b = 12 \dots 15$ °С против $\Delta t_b = 7 \dots 9$ °С при утилизации теплоты только газов байпасной линии с 20 %-м расходом.

Результаты расчетов такого варианта ТУОНВ (схема на рис. 3,а) представлены на рис. 5.

Приведенные величины \bar{q}_r , \bar{q}_0 и Δt_b соответствуют 20 %-му расходу газов через байпас, когда за счет пятикратно увеличенного расхода газов на экономайзерную секцию (по сравнению с испарительной секцией на байпасной линии) ее тепловая нагрузка равна нагрузке испарительной секции, несмотря на меньшую соответственно в 5 раз располагаемую разность температур после УК, $t_{r1} - t_{r2} = 180 - 150 = 30$ °С, срабатываемую в экономайзерной секции по сравнению с испарительной.

Для того, чтобы оценить величину снижения температуры Δt_b наддувочного воздуха в испарителе ТУОНВ, приведенные на рис. 5 значения следует умножить на 0,2. В результате получаем, что схемное решение ТУОНВ на рис. 3,а обеспечивает снижение температуры воздуха на величину $\Delta t_b = 15 - 20$ °С (при 20 %-м байпасе).

За счет утилизации в испарительной секции всего избыточного теплового потенциала уходящих газов (газов байпасной линии), а в экономайзерной — газов после УК удельные отводы теплоты экономайзерной секцией \bar{q}_r' и генератором в целом \bar{q}_r непрерывно возрастают с повышением температуры кипения t_r в генераторе (при постоянстве отвода теплоты испарительной секцией \bar{q}_r''). Как следствие, непрерывно увеличивается удельная холодопроизводительность \bar{q}_0 и снижение температуры наддувочного воздуха Δt_b .

Дальнейшее увеличение эффективности утилизации избыточной теплоты уходящих газов возможно при использовании в ТУОНВ всего теплового потенциала газов после турбины ТК. Схема такой ТУОНВ с экономайзерной секцией генератора, установленной на уходящих газах после утилизационной газовой турбины ТК, и испарительной секцией — на байпасной линии уходящих газов в обход ГТ ТК, представлена выше на рис. 3,б.

Для оценки эффективности такого варианта утилизации можно использовать результаты расчетов, приведенные на рис.5, но с учетом увеличения теплового потенциала на величину, которая раньше использовалась в

пароводяном УК, т.е. эквивалентную разности температур на входе и выходе из УК, $t_{r1} - t_{r2} = 250 - 180 = 70$ °С, отнесенной к 80 %-му расходу уходящих газов (при 20 %-м байпасе). Результаты расчетов по тепловым балансам, составленным в соответствии с температурами и расходами уходящих газов через секции генератора ТУОНВ, показывают, что количество теплоты, обычно утилизируемой в УК, равно избыточной теплоте уходящих газов, используемой в ТУОНВ с испарительной секцией генератора на байпасной линии и экономайзерной — на суммарном потоке газов после УК (схема на рис. 3,а). Поэтому приведенные на рис. 5 значения следует умножать не на 0,2, а на 0,4. В результате получаем, что схемное решение ТУОНВ на рис. 3,б обеспечивает снижение температуры наддувочного воздуха на величину $\Delta t_b = 25 - 30$ °С при $t_r = 110$ °С и 20 %-м расходе уходящих газов через байпасную линию.

С учетом того, что снижение температуры наддувочного воздуха после ОНВ в испарителе ТУОНВ на величину $\Delta t_b = 10$ °С приводит к уменьшению удельного расхода топлива примерно на 0,7% [4], получаем, что утилизация избыточного теплового потенциала уходящих газов байпасной линии и после турбины ТК согласно схеме на рис. 4,б обеспечивает сокращение удельного расхода топлива почти на 2%. Соответственно при работе ТУОВ совместно с УК (схема на рис. 4,а) сокращение удельного расхода топлива составляет около 1%.

ВЫВОДЫ

1. Использование избыточной, сверх необходимой для привода наддувочного компрессора, тепловой энергии уходящих газов в эжекторных ТУОВ для охлаждения наддувочного воздуха ДВС обеспечивает сокращение удельного расхода топлива примерно на 2 % в случае отсутствия УК и 1 % — при утилизации части теплоты газов в УК. При этом температура наддувочного воздуха снижается соответственно на 25...30 и 15 °С по сравнению с его охлаждением в водяном ОНВ.
2. Предложены схемные решения систем охлаждения наддувочного воздуха ДВС с использованием эжекторных ТУОВ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.
- [2] MAN B&W. Project Guide. Two-stroke Engines. MC Programme. Vol. 1: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 1986.
- [3] *Shiraishi K., Ono Y.* Hybrid Turbocharger with integrated High Speed Motor-generator // Technical Review: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. — 2007. — Vol. 44. — No. 1 (Mar.). — 3 p.
- [4] MAN Engine Selection Guide. MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark.
- [5] Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.