

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИКЛОВОГО ВОЗДУХА ДИЗЕЛЕЙ

Р. Н. Радченко, аспирант;
А. А. Андреев, аспирант

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Приведены результаты оценки эффективности использования избыточной, сверх необходимой для наддува дизелей, тепловой энергии уходящих газов в установках охлаждения наддувочного воздуха. Предложены схемные решения теплоиспользующих систем охлаждения циклового воздуха дизелей.

Ключевые слова: малооборотный дизель, утилизация, уходящие газы, охлаждение наддувочного воздуха, теплоиспользующая установка.

Анотація. Наведено результати оцінки ефективності використання надлишкової, понад необхідну для наддуву дизелів, теплової енергії відхідних газів в установках охолодження наддувочного повітря. Запропоновані схемні рішення тепловикористовуючих систем охолодження циклового повітря дизелів.

Ключові слова: малооборотний дизель, утилізація, відхідні гази, охолодження наддувочного повітря, тепловикористовуюча установка.

Abstract. The evaluation results of effectiveness of using the excessive, over required for charging air of diesels, thermal energy of exhaust gases in waste heat recovery systems for cooling charged air. The schemes of waste heat recovery systems for cooling the cyclic air of diesels were proposed.

Keywords: low-speed diesel, utilization, exhaust gases, boost air, heat-using system.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Основным направлением повышения эффективности судовых дизельных установок (ДУ) остается использование их вторичных энергоресурсов (ВЭР), прежде всего теплоты уходящих газов, в утилизационных пароводяных котлах (УК). Однако для большинства типов судов количество тепловой энергии, вырабатываемой в УК на ходу судна, уже при температуре наружного воздуха $t_{н.в} = 0$ °С превышает общесудовые потребности в ней [2], а при $t_{н.в} = 25$ °С и выше это превышение составляет 2,0...2,5 раза. В то же время потребности в холоде, наоборот, резко возрастают, поскольку при

высоких температурах забортной воды $t_{з.в}$ охладители наддувочного воздуха (ОНВ) не обеспечивают достаточного глубокого охлаждения наддувочного воздуха дизелей, которое могло бы нивелировать повышение температуры воздуха на входе наддувочного ТК. Это приводит к значительному перерасходу топлива.

Проблема снижения топливной экономичности при повышенных температурах наружного воздуха и забортной воды особенно остро стоит в высоконаддувных дизелях, компрессоры которых обеспечивают высокие степени повышения давления воздуха $\pi_k = 3...4,5$, а в перспективе и $\pi_k = 5$ [1]. Благодаря высоким КПД современных тур-

бокомпрессоров (ТК) $\eta_{\text{ТК}} = 0,70 \dots 0,75$ мощность их утилизационных газовых турбин превышает мощность, необходимую для наддува дизелей. Избыточная энергия уходящих газов реализуется турбокомпаундными системами (ТКС) с дополнительной газовой турбиной, установленной на байпасной линии уходящих газов в обход наддувочного ТК [5]. Однако эффективность применения ТКС, как и самой ДУ, также снижается с повышением температур $t_{\text{н.в}}$ и $t_{\text{з.в}}$. Кроме того, приемлемый срок окупаемости таких систем (5...10 лет) возможен при больших мощностях ДУ: 20...60 МВт и выше [5].

ЦЕЛЬЮ ИССЛЕДОВАНИЯ является оценка целесообразности утилизации избыточной теплоты уходящих газов малооборотных дизелей (МОД) теплоиспользующей установкой охлаждения воздуха (ТУОВ). Такие ТУОВ могли бы обеспечить эффективную эксплуатацию МОД при повышенных температурах $t_{\text{н.в}}$ и $t_{\text{з.в}}$ и покрыть тот диапазон их мощностного ряда (менее 20 МВт), в котором применение дорогостоящих ТКС экономически не целесообразно.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Результаты расчета избытка мощности утилизационной турбины сверх требуемой для привода наддувочного ТК $\Delta N_{\text{ТК}}$ для ма-

лооборотного дизеля 5RTA 52 мощностью $N_e = 8000$ кВт представлены на рис. 1.

Избыток мощности определяли в виде отношения $\Delta N_{\text{ТК}} = (N_{\text{т}} - N_{\text{к}})/N_{\text{к}}$.

Расчеты выполнены с учетом влияния температуры окружающего воздуха $t_{\text{о.в}}$ на входе компрессора ТК на температуру уходящих газов $t_{\text{т1}}$ на входе утилизационной турбины ТК: $t_{\text{т1}} = f(t_{\text{о.в}})$. Так, согласно данным фирм «МАН – Бурмейстер и Вайн» и «Вяртсила – Нью Зульцер», повышение температуры наружного воздуха на входе ТК на 10°C вызывает возрастание температуры газов на выходе дизелей на 16°C [3]. Учитывали также зависимость КПД компрессора $\eta_{\text{к}}$ от степени повышения давления $\pi_{\text{к}}$: $\eta_{\text{к}} = 0,85$ при $\pi_{\text{к}} = 3$ и $\eta_{\text{к}} = 0,80$ при $\pi_{\text{к}} = 4$.

Как видно, резерв мощности ТК достаточно значительный: $\Delta N_{\text{ТК}} = 8 \dots 15\%$ при $\pi_{\text{к}} = 3$ в интервале температур $t_{\text{н.в}} = 10 \dots 45^\circ\text{C}$. Следует заметить, что расчет избытка мощности ТК проводили исходя из пессимистического варианта, когда значения некоторых эмпирических постоянных принимали для худших, с точки зрения образования резерва мощности, условий. Потенциально же возможное превышение мощности турбины над мощностью компрессора достигает 30%.

Избыток тепловой энергии уходящих газов может быть реализован теплоиспользующей, в частности эжекторной ТУОВ, как

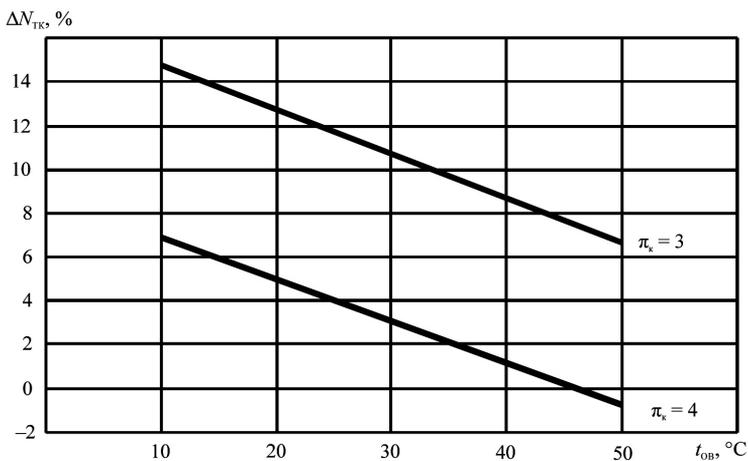


Рис. 1. Избыток мощности $\Delta N_{\text{ТК}}$ утилизационной турбины сверх необходимой мощности наддувочного ТК в зависимости от температуры окружающего воздуха $t_{\text{о.в}}$ на входе ТК с учетом зависимости $\eta_{\text{к}} = f(\pi_{\text{к}})$

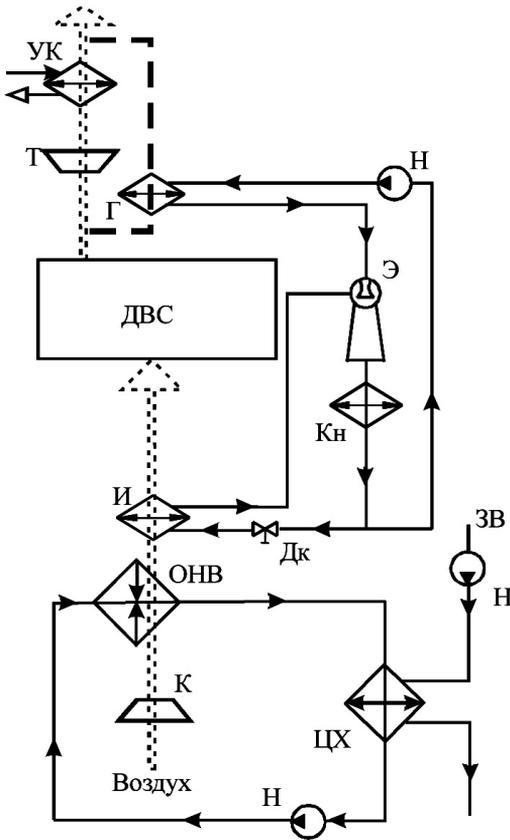


Рис. 2. Схема системы охлаждения наддувочного воздуха ДВС на базе эжекторной ТУОВ, использующей теплоту избыточного количества уходящих газов: Т — турбина ТК; К — наддувочный компрессор; УК — утилизационный котел; ОНВ — охладитель наддувочного воздуха водяной; ЦХ — центральный холодильник; ЗВ — заборная вода; Г — генератор; Э — эжектор; Кн — конденсатор; Н — насос; Дк — дроссельный клапан; И — испаритель-воздухоохладитель ЦХ

конструктивно наиболее простой. Схема системы охлаждения наддувочного воздуха на базе эжекторной ТУОВ представлена на рис.2. Генератор ТУОВ устанавливают на байпасной линии уходящих газов в обход ТК, расход газов через которую прямо пропорционален превышению мощности турбины ТК над мощностью наддувочного компрессора и может составлять 20...30% общего количества газов после цилиндров двигателя.

В генераторе ТУОВ срабатывает весь тепловой потенциал избыточного количества уходящих газов, сверх необходи-

мого для привода наддувочного ТК, определяемый разностью температур газов $t_{r1} - t_{r2} = 350 - 150 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, где температура газов на выходе t_{r2} ограничена условием недопущения сернистой коррозии материала экономайзерных поверхностей генератора ТУОВ.

Значения параметров при температурах уходящих газов на входе генератора $t_{r1} = 350$ и $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и на его выходе $t_{r2} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ представлены на рис. 3. В качестве НРТ применен озонобезопасный хладагент R142В, температуры конденсации $t_k = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ и кипения $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Как видно, при неизменной удельной тепловой нагрузке на генератор ТУОВ ($\bar{q}_r = \text{const}$) возрастание теплового коэффициента ζ замедляющимся темпом с повышением t_r от 80 до $120 \text{ }^\circ\text{C}$ обуславливает замедление увеличения удельной холодопроизводительности ТУОВ и прямо пропорционального ей снижения температуры охлаждаемого наддувочного воздуха в испарителе Δt_b — с достижением максимума при максимально допустимой (исходя из термической стойкости хладагента R142В) температуре $t_r = 120 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом снижение температуры наддувочного воздуха в испарителе, отнесенное к расходу уходящих газов через байпасную линию, $\Delta t_b = 35 \dots 45 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно при $t_{r1} = 350$ и $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Действительная же величина снижения температуры наддувочного воздуха в испарителе, отнесенного к его расходу, весьма незначительная: $\Delta t_b = 7 \dots 9 \text{ }^\circ\text{C}$ при 20%-м расходе уходящих газов через байпасную линию и $\Delta t_b = 12 \dots 15 \text{ }^\circ\text{C}$ при 30%-м.

В схеме на рис. 2 не используется теплота уходящих газов после УК. Температура их невысокая ($t_{yr1} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$), зато расход газов во много раз превышает его величину через байпасную линию: в 5 раз при доле байпасируемых газов 20%. Располагаемый теплоперепад газов (с общим расходом) после УК определяется разностью их температур $t_{yr1} - t_{yr2} = 180 - 150 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ и эквивалентен теплосодержанию газов в байпасной линии (с 20%-м расходом), соответствующему пятикратной разности температур $30 \cdot 5 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, отнесенной к расходу газов через байпасную линию. Как видно, те-

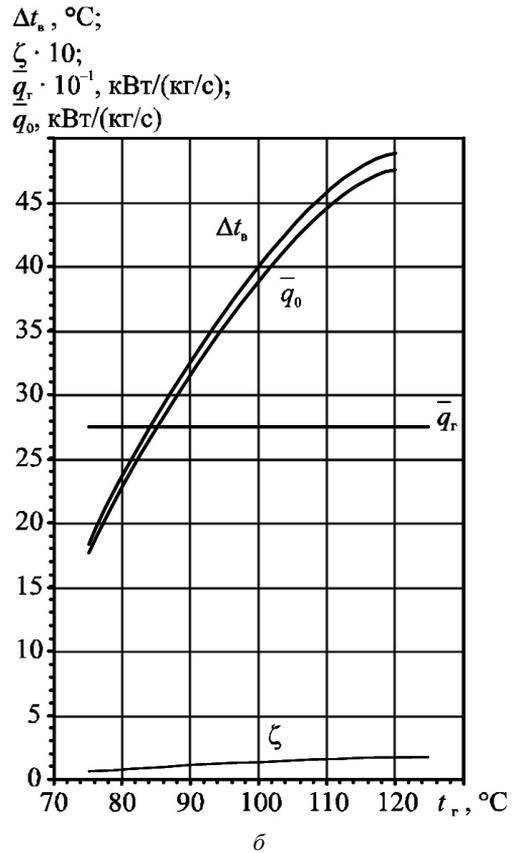
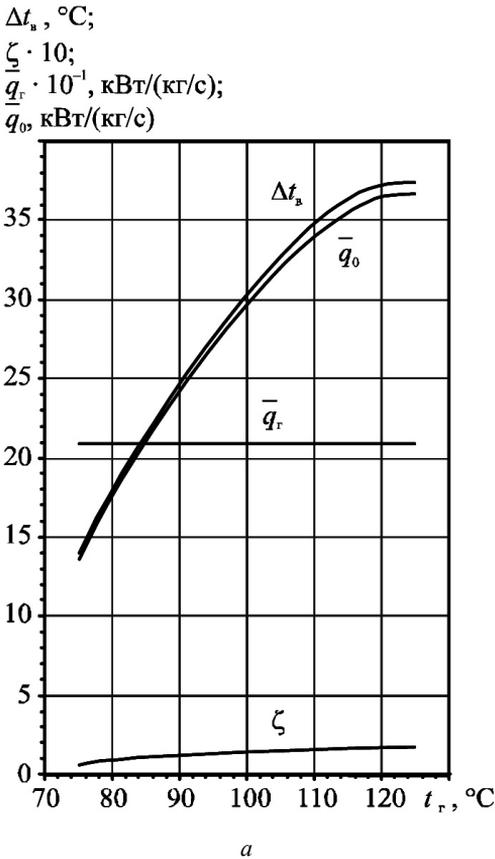


Рис. 3. Удельные значения, приходящиеся на единичный расход уходящих газов через байпасную линию, тепловой нагрузки на испаритель эжекторной ТУОВ \bar{q}_0 и генератор \bar{q}_r , снижения температуры t_b наддувочного воздуха, теплового коэффициента ТУОВ ζ в зависимости от температуры кипения хладона R142В в генераторе t_r при температурах уходящих газов на входе генератора t_{r1} : а — $t_{r1} = 350^\circ\text{C}$; б — 400°C

плосодержание газов после УК составляет 75 % от теплоперепада, срабатываемого в генераторе на байпасной линии (схема на рис. 2). Таким образом, утилизация теплоты уходящих газов байпасной линии и после УК обеспечит увеличенные на 75 % удельную холодопроизводительность и, соответственно, снижение температуры воздуха в испарителе ТУОВ: $\Delta t_b = 12...15^\circ\text{C}$ против $\Delta t_b = 7...9^\circ\text{C}$ при утилизации теплоты только газов байпасной линии с 20%-м расходом. Соответствующее схемное решение ТУОВ приведено на рис. 4, а.

Наибольшая холодопроизводительность ТУОВ достигается в случае утилизации всего избыточного теплового потенциала уходящих газов байпасной линии и после турбины

ТК (тепловой потенциал газов после турбины обычно использовался в УК). Схема такой ТУОВ с генератором, установленным в общем газовыпускном тракте после утилизационной газовой турбины ТК, приведена на рис. 4, б.

Результаты расчета удельной теплоты, приходящейся на единичный расход уходящих газов (наддувочного воздуха), отведенной от газов в генераторе эжекторной ТУОВ \bar{q}_r и от наддувочного воздуха в испарителе ТУОВ после ОНВ (удельной холодопроизводительности ТУОВ) \bar{q}_0 , снижения температуры t_b наддувочного воздуха, теплового коэффициента ТУОВ ζ в зависимости от температуры кипения хладона R142В в генераторе t_r при температуре суммарного потока уходящих газов на входе генератора (газов после

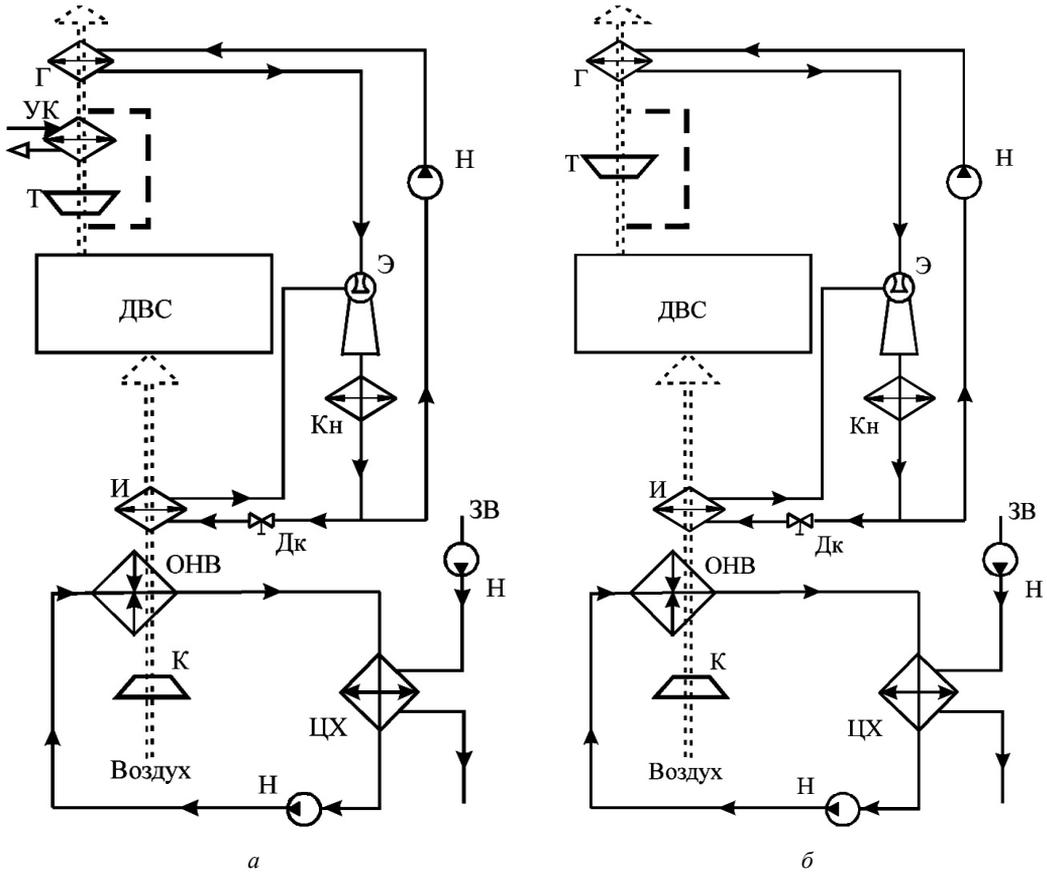


Рис. 4. Схемы систем охлаждения наддувочного воздуха ДВС на базе эжекторной ТУОВ (обозначения те же, что на рис. 2)

ТК и байпасной линии) $t_{yr1} = 280 \text{ }^\circ\text{C}$ и на его выходе $t_{yr2} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ представлены на рис. 5. Температура суммарного потока уходящих газов на входе генератора t_{yr1} находилась из теплового баланса процесса смешения газов после ТК (температура $250 \text{ }^\circ\text{C}$ и 80 % общего расхода) и байпасной линии (температура $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и 20 % общего расхода).

Как видно, утилизация всего избыточного теплового потенциала уходящих газов (газов байпасной линии и после турбины ТК на рис. 4, б) обеспечивает снижение температуры наддувочного воздуха в испарителе ТУОВ: $\Delta t_b \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$ при температуре газов после цилиндров дизеля $t_{r1} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ против $\Delta t_b = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ при работе ТУОВ совместно с УК в соответствии со схемой на рис. 4, а.

О повышении топливной экономичности судовых МОД за счет охлаждения наддувоч-

ного воздуха в ТУОВ по сравнению с обычным водяным охлаждением можно судить по изменению удельного расхода топлива g_e в относительных величинах (отнесенных к удельным расходам топлива при температурах наддувочного воздуха t_n , соответствующих $g_e = 100 \%$) в зависимости от температуры наддувочного воздуха t_n при температуре наружного воздуха на входе в ТК $t_{н.в} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ и разных степенях повышения давления в ТК π_k , приведенным по данным фирмы «Вяртсила – Нью Зульцер» [4] на рис. 6.

Как видно, дополнительное (к водяному охлаждению в ОНВ) понижение температуры наддувочного воздуха в испарителе ТУОВ на величину $\Delta t_b = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (утилизация избыточного теплового потенциала уходящих газов байпасной линии и после турбины ТК 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%.

Избыточная теплота уходящих газов может быть использована в ТУОВ для охлаж-

дения воздуха на входе ТК дизеля (схема на рис. 7).

Применение ТУОВ обеспечивает снижение температуры воздуха на входе ТК на величину $\Delta t_b = 25^\circ\text{C}$ с сокращением удельного расхода топлива свыше 2%.

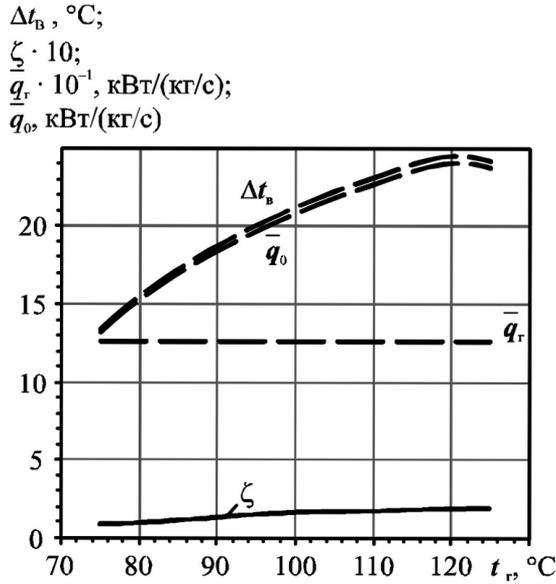


Рис. 5. Значения параметров \bar{q}_0 , \bar{q}_r , Δt_b , ζ эжекторной ТУОВ при температуре суммарного потока уходящих газов на входе генератора $t_{r1} = 280^\circ\text{C}$ и на его выходе $t_{r2} = 150^\circ\text{C}$

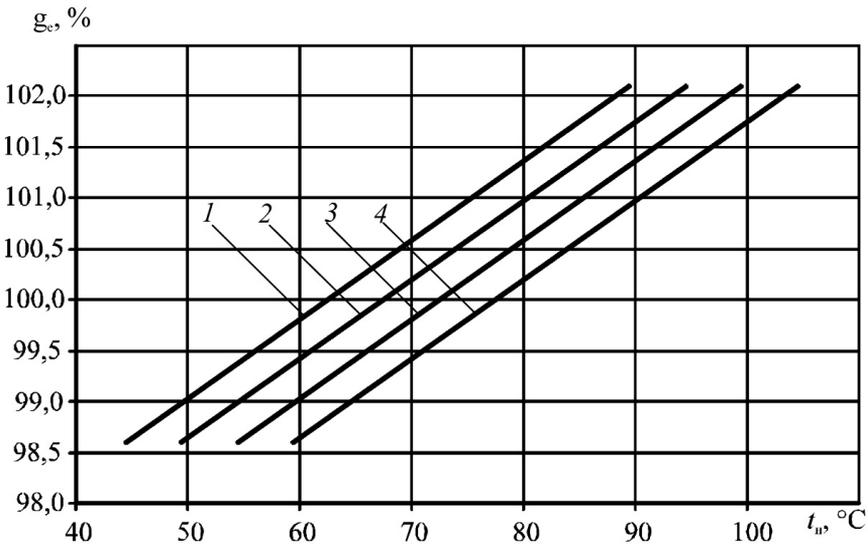


Рис. 6. Значение удельного расхода топлива g_c в относительных величинах при степенях повышения давления в ТК π_k : 1 — $\pi_k = 3,0$; 2 — 3,5; 3 — 4,0; 4 — 4,5

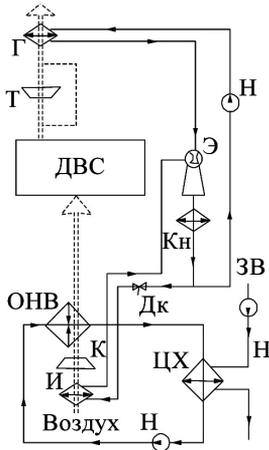


Рис. 7. Схема системы охлаждения воздуха на входе ТК ДВС на базе эжекторной ТУОВ (обозначения приведены на рис. 2)

ВЫВОДЫ

1. Выполненные исследования показали, что использование избыточной, сверхнеобходимой для привода наддувочного компрессора, тепловой энергии уходящих газов в эжекторных ТУОВ для охлаждения наддувочного воздуха МОД 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 и 15 °С по сравнению с его охлаждением в водяном ОНВ.

2. Предложены схемные решения систем охлаждения наддувочного воздуха МОД с использованием эжекторных ТУОВ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Heim K. Existing and Future Demands on the turbocharging of Modern Large Two-stroke Diesel Engines // 8-th Supercharging Conference, Dresden, 1–2 October 2002.
- [2] Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation / MAN B&W Diesel A/S. — Copenhagen, Denmark, 2005.
- [3] MAN B&W. Project Guide. Twostroke Engines. MC Programme / MAN B&W Diesel A/S. — Copenhagen, Denmark, 1986. — Vol. 1.
- [4] Sulzer RTA-U. Engine selection and project manual. 25.28.07.40. — Issue XII.98 — Rev. 0.
- [5] Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission / MAN B&W Diesel A/S. — Copenhagen, Denmark, 2005.