

Рис. 4 – Залежності надлишку стисненого повітря ΔG_k від температури зовнішнього повітря $t_{нв}$ (а) та охолодженої суміші повітря на вході в компресор $t_{сум}$ при степенях наддуву π_k

Висновки

Розроблено схеми турбодетандерних систем охолодження повітря на вході ДГ, які використовують енергію відхідних газів, забезпечують зниження температури повітря на вході ТК на 20...30 °С і, як результат, скорочення питомої витрати палива на 2...3 %.

Література

1. Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.
2. Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.
3. Zinner K., Reinloin H. Thermodynamische Untersuchung über die Anwendbarkeit der Turbokühlung bei aufgeladenen vierfakt // Dieselmotoren, «MTZ». – 1964.–Nr. 5.–S.188–195.
4. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.

Дослідження виконане за фінансової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень МОН України у рамках гранту Президента України.

УДК 621.436: 621.57

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ СУДОВОГО МАЛОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ЭЖЕКТОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ

Радченко Р.Н., научн. сотрудник, Охотин С.А., Казанцева В.Е., магистранты
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев

Разработана математическая модель процессов охлаждения воздуха на входе судового малооборотного дизеля в теплоиспользующей холодильной машине, утилизирующей теплоту выпускных газов.

The mathematical model of the processes of cooling the air at the intake of marine low speed diesel engine in the waste heat recovery refrigeration system utilizing the heat of exhaust gases has been developed.

Ключевые слова: охлаждения наружного воздуха, судовой малооборотный дизель, утилизация теплоты.

Термотрансформатор ТТЭ состоит из высокотемпературного (силового) и низкотемпературного (холодильного) контуров. В силовом контуре теплота отводится от выпускных газов МОД в процессе испарения НРТ при высоких давлении и температуре кипения $t_t = 100...120$ °С (в генераторе паров НРТ). В холодильном контуре теплота отводится от воздуха на входе ТК к НРТ, кипящему в испарителе (воздухоохладителе) низкого давления при температуре кипения $t_0 = 0...5$ °С. Энергия паров НРТ высокого давления используется в эжекторе для повышения давления паров НРТ, поступающих из испарителя (ВО) низкого давления холодильного контура, до давления и температуры конденсации t_k .

Основные рабочие процессы МОД с охлаждением воздуха на входе ТК в термотрансформаторе и утилизацией теплоты выпускных газов показаны на рис. 2.

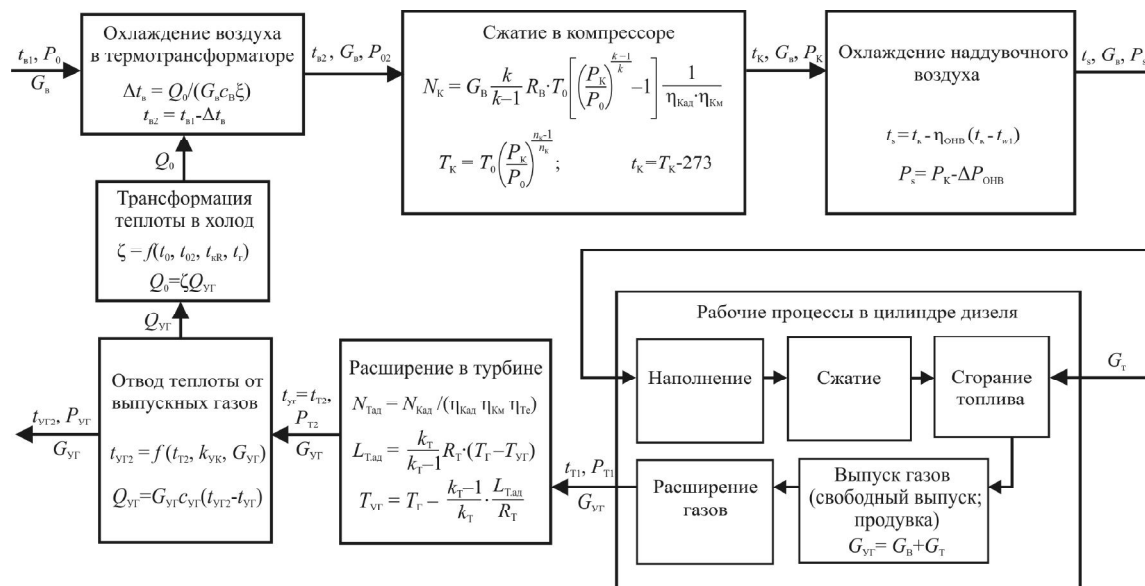


Рис. 2 – Основные рабочие процессы МОД с утилизацией теплоты выпускных газов и охлаждением воздуха на входе ТК в термотрансформаторе

Как видно из рис. 2, выходные параметры расчета процессов охлаждения воздуха на входе ТК являются входными для расчета температуры и расхода выпускных газов МОД, которые, в свою очередь, — входными для расчета процессов трансформации теплоты выпускных газов в холод, используемый для охлаждения воздуха на входе МОД.

Укрупненная блок-схема расчета процессов трансформации теплоты выпускных газов в ТТЭ с фазовым переходом НРТ и охлаждением воздуха на входе ТК МОД показана на рис. 3.

Расчет процессов охлаждения воздуха в И-ВО на входе ТК включает в себя вычисление снижения температуры воздуха Δt_b как $\Delta t_b = Q_0 / (G_b \cdot c_{вл} \cdot \xi)$, где $c_{вл}$ — теплоемкость влажного воздуха; ξ — коэффициент влаговываждения, соответственно, температуры воздуха t_{b2} после И-ВО — на входе ТК МОД. При этом изменение энтальпии ΔI_b влажного воздуха в И-ВО находят по холодопроизводительности Q_0 ТТЭ, $\Delta I_b = Q_0 / G_b$, которую вычисляют исходя из располагаемой теплоты выпускных газов $Q_T = G_T \cdot c_T \cdot (t_{yT} - t_{yT2})$ как $Q_0 = \zeta \cdot Q_T$. Тепловой коэффициент ζ и коэффициент эжекции U вычисляют в ходе расчета процессов трансформации теплоты выпускных газов в холод в ТТЭ в зависимости от температур цикла ТТЭ (t_0, t_t, t_k) и перегрева пара Δt_d в дисперсном режиме испарения НРТ в И-ВО: $\zeta = f(U, t_0, t_t, t_k, \Delta t_d)$; $U = f(t_0, t_t, t_k, \Delta t_d)$.

Расчет процессов охлаждения воздуха в И-ВО включает в себя также расчет процессов теплообмена в И-ВО с нахождением максимальных значений плотности теплового потока q_{max} , массовой скорости НРТ в трубках И-ВО $(\rho w)_{opt}$, логарифмической разности температур θ_{opt} и соответствующей ей температуры кипения НРТ в И-ВО t_0 , исходя из которой вычисляют $U = f(t_0, t_t, t_k, \Delta t_d)$ и $\zeta = f(U, t_0, t_t, t_k, \Delta t_d)$.

Процесс охлаждения влажного воздуха в ВО на входе ТК характеризуется коэффициентом влаговываждения ξ , представляющим собой отношение полного количества теплоты (разность энтальпий воздуха в ВО), отведенной от влажного воздуха в ВО, к количеству явной теплоты, определяемому разностью температур по сухому термометру: $\xi = (I_{b1} - I_{b2}) / [c_{вл} \cdot (t_{b1} - t_{b2})]$, где $c_{вл}$ — теплоемкость влажного воздуха. При этом энтальпия влажного воздуха рассчитывается как

$$I_b = c_{вл} \cdot t_b + r_{II} \cdot d = (1,01 + 1,89d) t_b + r_{II} \cdot d, \text{ кДж/кг,}$$

где $r_{п}$ — удельная теплота фазового превращения (конденсации), $r_{п} \approx 2500$ кДж/кг;
 d — влагосодержание воздуха, т.е. количество водяных паров в 1 кг сухой части воздуха, кг/кг с.в.;
 $c_{вл}$ — теплоемкость влажного воздуха, $c_{вл} = 1,01 + 1,89d$; $d = 0,622 P_{п} / (P - P_{п})$ или с учетом $\phi = \rho_{п} / \rho_{п}'' = P_{п} / P_{п}''$ получаем $d = 0,622 \phi P_{п}'' / (P - \phi P_{п}'')$, где P , $P_{п}$ и $P_{п}''$ — давление влажного воздуха, парциальные давления водяного пара в ненасыщенном и насыщенном воздухе (давление водяного пара в состоянии насыщения).

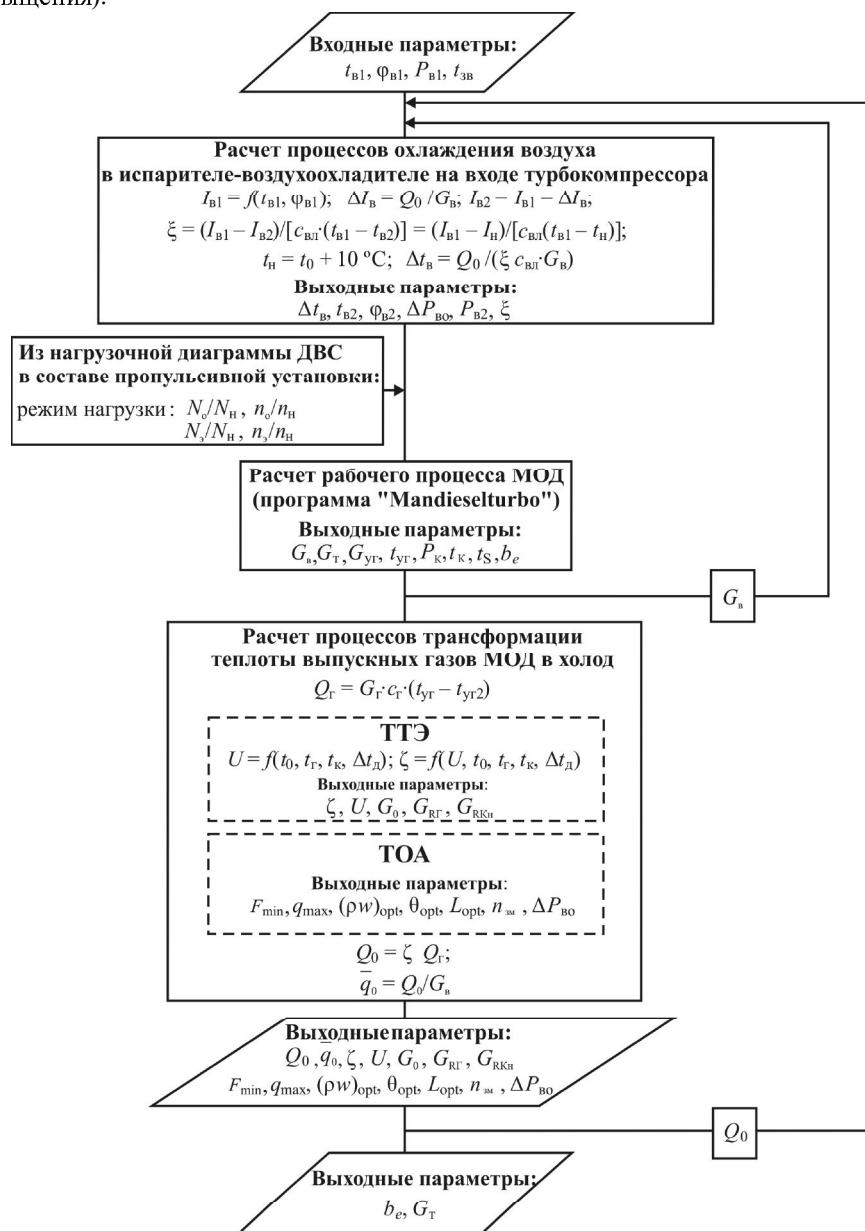


Рис. 3 – Укрупненная блок-схема расчета процессов трансформации теплоты выпускных газов с охлаждением воздуха на входе ТК ДВС

Температура $t_{гг}$ и расход $G_{гг}$ выпускных газов, определяющие располагаемую теплоту газов $Q_{г}$, являются выходными параметрами фирменной программы [4], для которой входным параметром является температура $t_{в2}$ воздуха на входе ТК, охлажденного в И-ВО ТТЭ. Поэтому вычислительная процедура представляет собой итерационный процесс и осуществляется методом последовательных приближений до совпадения значений $t_{гг}$ в двух последующих итерациях.

Входными данными для фирменной программы расчета параметров МОД [4] являются (помимо температуры $t_{в2}$ охлажденного воздуха на входе ТК и охлаждающей воды на входе ОНВ t_{w1}) режимы нагрузки двигателя в составе судовой пропульсивной установки, которые могут быть получены из нагрузочной диаграммы двигателя для конкретного судна.

Выходными параметрами программы расчета [4] являются температура выпускных газов после ТК $t_{гт}$ и их расход $G_{гт}$, температура наддувочного воздуха после ТК $t_{тк}$ и его расход $G_{в}$, удельный расход топлива b_e , которые устанавливаются исходя из температуры $t_{в2}$ воздуха на входе ТК.

Локальные коэффициенты теплоотдачи к НРТ α_a , воздуху α_b и теплопередачи k , плотности теплового потока q , отнесенные к внутренней поверхности трубки, температуры воздуха t_b и температурного напора θ в зависимости от паросодержания x и длины змеевика И-ВО L , рассчитанные с помощью математической модели, приведены на рис. 4 для условий работы: температуры воздуха на входе $t_{в1} = 35$ °С и выходе $t_{в2} = 10$ °С из И-ВО, кипения НРТ на выходе И-ВО $t_{02} = 0$ °С; НРТ – R142В.

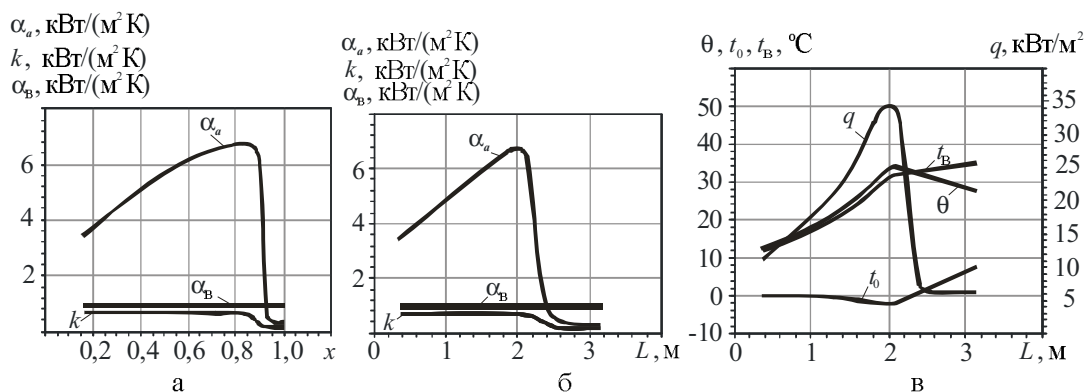


Рис. 4 – Изменение коэффициентов теплоотдачи к НРТ α_a , воздуху α_b и теплопередачи k , отнесенных к внутренней поверхности трубки И-ВО, в зависимости от паросодержания x (а) и длины трубки L (б), а также температуры воздуха t_b , кипящего НРТ R142В t_0 , температурного напора θ и плотности теплового потока q , отнесенной к внутренней поверхности трубки (в)

Резкое снижение коэффициента теплоотдачи к НРТ α_a , который становится даже ниже его значения к воздуху α_b , отнесенного к внутренней поверхности труб И-ВО, и вызывает снижение коэффициента теплопередачи k и плотности теплового потока q , происходит при граничном паросодержании $x_{гп} = 0,90...0,95$, соответствующем осушению стенки трубки с переходом от дисперсно-кольцевого к дисперсному течению. Перегрев пара в дисперсной смеси, о чем свидетельствует увеличение температуры НРТ t_0 , вызывает уменьшение не только температурного напора θ и, следовательно, плотности теплового потока q , но и коэффициента эжекции U и теплового коэффициента ζ ТГЭ. Вполне логично исключить дисперсный режим испарения, т.е. перейти на неполное испарение, например путем рециркуляции жидкого НРТ в И-ВО инжектором, использующим потенциальную энергию НРТ, поступающего из конденсатора, теряемую в дроссельном клапане ДК на рис. 1. Результаты расчетов показывают, что за счет этого можно увеличить тепловой коэффициент ζ , холодопроизводительность $Q_0 = \zeta Q_T$ и, глубину охлаждения воздуха Δt_b в И-ВО на входе ТК МОД на 20...30 %.

Выводы

Разработана математическая модель процессов охлаждения воздуха на входе судового малооборотного дизеля в теплоиспользующей холодильной машине на НРТ, утилизирующей теплоту выпускных газов. Особенностью математической модели является то, что она учитывает локальные параметры при фазовом переходе НРТ и позволяет сократить потери от внутренней необратимости в холодильном цикле, вызванные низкой интенсивностью теплообмена.

Литература

1. Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation. – MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark. – 2005. – 15 p.
2. MAN B&W. Project Guide. Two-stroke Engines. MC Programme. Vol. 1. – MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark. – 1986.
3. Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO2 emission. – MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark. – 2005.– 12 p.
4. MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-III engines. – Copenhagen, Denmark: MAN Diesel. – 2010.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований МОН Украины в рамках гранта Президента Украины.