

УДК 621.436; 621.57

Р.Н. РАДЧЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЕ ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ КОНТУРЫ НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА ДИЗЕЛЕЙ

Выполнен анализ эффективности испарителей теплоиспользующих установок, утилизирующих теплоту уходящих газов для охлаждения воздуха на входе наддувочных компрессоров дизелей. Приведены локальные тепловые характеристики вдоль змеевиков испарителей-воздухоохладителей. Предложено схемное решение теплоиспользующей установки охлаждения с рециркуляцией низкокипящего рабочего тела в испарителе-воздухоохладителе инжектором, обеспечивающей исключение завершающей стадии фазового перехода с крайне низкой интенсивностью теплоотдачи и, как следствие, повышение плотности теплового потока.

Ключевые слова: дизель, тригенерация, утилизация теплоты, уходящие газы, охлаждение воздуха, низкокипящее рабочее тело, испаритель, рециркуляция.

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Эффективность работы дизелей зависит от температуры воздуха на входе наддувочных турбокомпрессоров (ТК), резко снижаясь с ее повышением. Улучшить показатели дизелей можно с помощью теплоиспользующих установок охлаждения (ТУО), утилизирующих теплоту уходящих газов (наддувочного воздуха, охлаждающей дизели воды) с выработкой холода, используемого, в свою очередь, для снижения температуры воздуха перед ТК [1]. Поскольку большинство судовых дизельных установок (ДУ) представляют собой энергетические установки когенерационного типа, производящие наряду с основным видом энергии (механической или электрической) еще и тепловую в виде пара, вырабатываемого утилизационными пароводяными котлами (УК), то дополнение таких когенерационных генераций холода в ТУО обращает их в тригенерационные ДУ.

Эффективность ТУО во многом зависит от работы их испарителей, в которых испарение низкокипящего рабочего тела (НРТ) происходит за счет теплоты, отводимой от воздуха на входе ТК дизелей. Чем выше плотность теплового потока в испарителях-воздухоохладителях (И-ВО), тем меньше температурные напоры θ в них между охлаждаемым воздухом и кипящим НРТ, что позволяет охладить воздух на входе ТК до более низкой температуры и за счет этого повысить эффективность дизелей (увеличить КПД и сократить удельный расход топлива). Поскольку плотность теплового потока в И-ВО с

кипением НРТ в трубках (змеевиках), зависит от интенсивности теплоотдачи к кипящему НРТ, которая, в свою очередь, – от его массовой скорости w , представляется целесообразным увеличение кратности циркуляции НРТ.

Цель исследования – анализ эффективности применения И-ВО с рециркуляцией НРТ в ТУО для предварительного охлаждения воздуха на входе ТК дизелей.

2. Изложение результатов исследования

Эффективность применения циркуляции НРТ в И-ВО ТУО проанализируем на примере ТУО эжекторного типа – наиболее простой из теплоиспользующих холодильных машин, в которой функцию компрессора выполняет эжектор. Схема эжекторной ТУО с рециркуляцией НРТ в И-ВО инжектором показана на рис. 1. Охлаждение воздуха на входе ТК дизелей осуществляется за счет использования в ТУО теплоты уходящих газов.

В ТУО отвод теплоты от уходящих газов происходит в генераторе паров НРТ высокого давления, а охлаждение воздуха на входе ТК дизеля – в И-ВО. Энергия паров НРТ высокого давления используется в эжекторе для поджатия паров НРТ низкого давления, всасываемых из И-ВО, до давления в конденсаторе.

Особенностью эжекторной ТУО на рис. 1 является наличие помимо основного пароструйного эжектора второго жидкостного струйного аппарата – инжектора, осуществляющего рециркуляцию жидкого НРТ в И-ВО. Для сепарации неиспарившегося

в И-ВО жидкого НРТ от паров предусмотрен отделитель жидкости, что обеспечивает эжектирование основным пароструйным эжектором сухого насыщенного пара с максимальным коэффициентом эжекции.

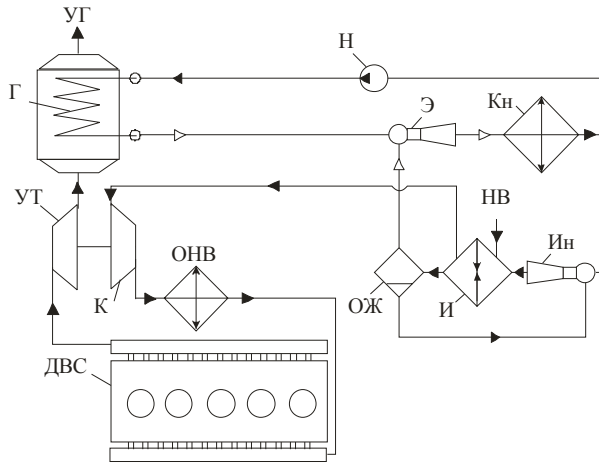


Рис. 1. Схема эжекторной ТУО с рециркуляцией НРТ в испарителе-воздухоохладителе инжектором:

Г – генератор паров НРТ; Э – эжектор;
Кн – конденсатор НРТ; Н – насос НРТ;
И-ВО – испаритель-воздухоохладитель;
ОНВ – охладитель наддувочного воздуха
водяной; К – компрессор; УТ – утилизирующая
турбина; НВ – наружный воздух;
УГ – уходящие газы

Об изменении коэффициентов теплоотдачи α_a к кипящему хладону R600 (н-бутану), воздуху α_b и теплопередачи k , а также плотности теплового потока q , логарифмической разности температур θ между охлаждаемым воздухом и кипящим хладоном, температур воздуха t_b и кипения t_0 хладона можно судить по их зависимости от длины L змеевика И-ВО на рис. 2. Температуры воздуха на входе и выходе из И-ВО: $t_{b1} = 35^\circ\text{C}$ и $t_{b2} = 10^\circ\text{C}$.

Резкое снижение коэффициента теплоотдачи α_a на рис. 2, а происходит на завершающей стадии испарения хладона R600 (при паросодержании x , близком 1) с переходом от дисперсно-кольцевого к дисперсному режиму течения вдоль осушенной поверхности канала (кризис теплоотдачи второго рода [2]). Следствием этого является уменьшение коэффициента теплопередачи k и плотности теплового потока q .

Из-за крайне низкой интенсивности теплоотдачи α_a от сухой внутренней стенки змеевика к пару в дисперсном режиме течения (при $x > 0,9$) для полного испарения капель жидкости требуется участок змеевика значительной длины L , составляющий около 20 % поверхности испарителя (рис. 2), хотя на нее приходится примерно 10 % тепловой нагрузки испарителя. Вполне логичным представляется исключить участки поверхности, приходящиеся на дисперсный режим испарения, т.е. перейти на неполный фазовый переход, например путем рециркуляции НРТ в И-ВО инжектором (рис. 1).

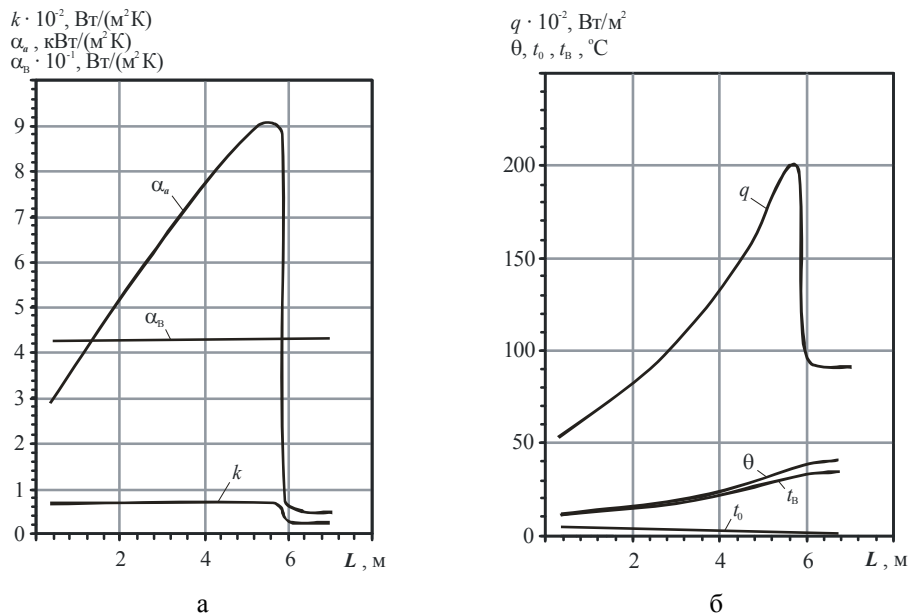


Рис. 2. Изменение коэффициентов теплоотдачи α_a к кипящему хладону R600, воздуху α_b и теплопередачи k (а), плотности теплового потока q , логарифмической разности температур θ , температур воздуха t_b и кипения t_0 (б) в И-ВО в зависимости от длины L его змеевика при $t_{b1} = 35^\circ\text{C}$ и $t_{b2} = 10^\circ\text{C}$

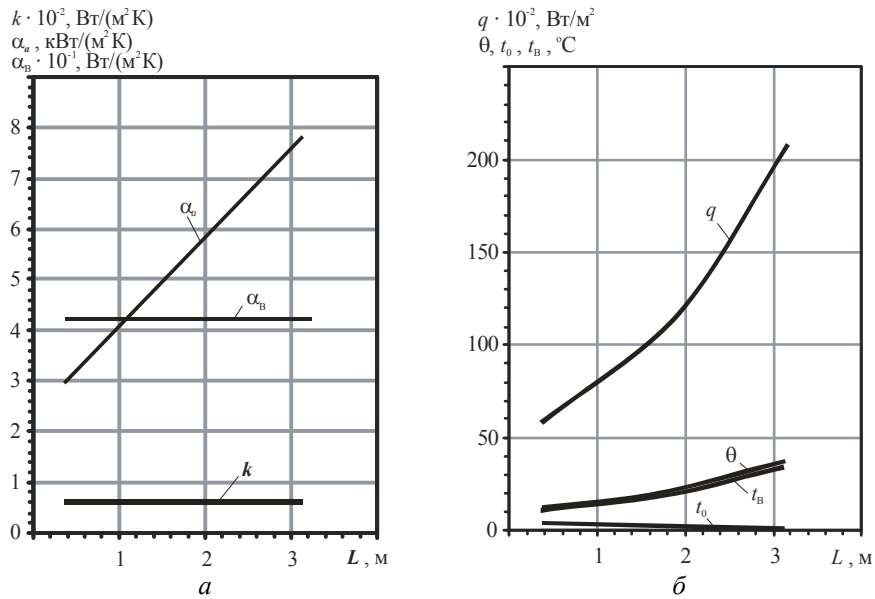


Рис. 3. Изменение коэффициентов теплоотдачи α_a к кипящему хладону R600, воздуху α_b и теплопередачи k (а), плотности теплового потока q , логарифмической разности температур θ , температур воздуха t_b и кипения t_0 (б) в И-ВО с рециркуляцией жидкого хладона в зависимости от длины L его змеевика при $t_{b1} = 35^\circ\text{C}$ и $t_{b2} = 10^\circ\text{C}$

О влиянии исключения завершающей стадии испарения можно судить по изменению локальных, по длине L змеевика, параметрах И-ВО, воздуха и кипящего хладона на рис. 3.

Как видно, рециркуляция НРТ в И-ВО обеспечивает высокую плотность теплового потока q на всей поверхности змеевиков, результатом чего является повышение средней плотности теплового потока примерно на 30 %.

Эффект от повышения плотности теплового потока может быть реализован либо сокращением поверхности И-ВО, либо уменьшением температурного напора θ между охлаждаемым воздухом и кипящим НРТ (при неизменной поверхности И-ВО). Последнее означает, что воздух на входе ТК дизеля может быть охлажден в И-ВО при более высокой температуре кипения НРТ t_0 .

Значение температуры кипения t_0 , соответствующее уменьшенному температурному напору θ , вычисляют по соотношению

$$t_0 = t_{b2} - \frac{t_{b1} - t_{b2}}{e^A - 1},$$

где $A = (t_{b1} - t_{b2})/\theta$, полученному потенцированием логарифмического уравнения

$$\theta = \frac{t_{b1} - t_{b2}}{\ln \frac{t_{b1} - t_0}{t_{b2} - t_0}}.$$

Результаты расчетов показывают, что благодаря сокращению температурного напора θ при рециркуляции жидкого НРТ в И-ВО температура ки-

пения в нем становится примерно на 5°C выше по сравнению с И-ВО без рециркуляции.

Эффективность ТУО характеризуется тепловым коэффициентом

$$\zeta = Q_0/Q_T,$$

представляющим собой отношение произведенного холода Q_0 к потребленному теплу Q_T (теплу, отведенному от уходящих газов в генераторе ТУО). С повышением t_0 на 5°C коэффициент ζ увеличивается на 0,05...0,10 в абсолютных величинах (меньшее значение соответствует температуре конденсации $t_k = 40^\circ\text{C}$, а большее – $t_k = 25^\circ\text{C}$) или в относительных – примерно на 30 %.

Повышение ζ и холодопроизводительности ТУО:

$$Q_0 = \zeta Q_T,$$

приводит к соответствующему увеличению снижения температуры Δt_b воздуха на входе ТК ДВС, которое находится из теплового баланса

$$Q_0 = G_b c_b \Delta t_b,$$

где G_b – расход наружного воздуха (производительность ТК) и c_b – теплоемкость воздуха.

Охлаждение воздуха перед ТК до более низкой температуры обеспечивает сокращение удельного расхода топлива. Так, каждые 10°C понижения температуры воздуха Δt_b на входе ТК приводят к сокращению удельного расхода топлива b_c дизелем на 0,5...0,6 % [1].

Результаты расчетов, выполненных автором для случая охлаждения воздуха на входе ТК малооборотного дизеля в эжекторной ТУО, использующей теплоту уходящих газов после ТК с температу-

рой $t_{r1} = 280$ °С (при исходной температуре воздуха на входе ТК $t_{b1} = 45$ °С), подтверждают возможность снижения температуры воздуха в ТУО на 30 °С, что обеспечивает сокращение удельного расхода топлива b_e на 1,5...1,8 %.

Выводы

Предложена теплоиспользующая установка с рециркуляцией НРТ в испарителе инжектором, которая утилизирует теплоту уходящих газов и позволяет уменьшить температуру воздуха на входе дизеля на 30 °С и сократить удельный расход топлива на 1,5...1,8 %.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента Украины (Розпорядження Президента України про призначення грантів Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених на 2009 рік від 16.12.2008 р. № 336/2008-рп).

Поступила в редакцию 29.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В.И. Живица, Одесская национальная морская академия, Одесса, Украина..

ТРИГЕНЕРАЦІЙНІ ЦИРКУЛЯЦІЙНІ ВИПАРОВУВАЛЬНІ КОНТУРИ НИЗЬКОКИПЛЯЧИХ РОБОЧИХ ТІЛ ПОПЕРЕДНЬОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ ДИЗЕЛІВ

Р.М. Радченко

Виконано аналіз ефективності випарників тепловикористовуючих установок, які утилізують теплоту відхідних газів для охолодження повітря на вході наддувних компресорів дизелів. Наведено локальні теплові характеристики вздовж змійовиків випарників-повітроохолоджувачів. Запропоновано схемне рішення тепловикористовуючої установки охолодження з рециркуляцією низькокиплячого робочого тіла у випарнику-повітроохолоджувачі инжектором, що забезпечує вилучення завершальної стадії фазового переходу з вкрай низькою інтенсивністю тепловіддачі та, як наслідок, підвищення густини теплового потоку.

Ключові слова: дизель, тригенерація, утилізація теплоти, відхідні гази, охолодження повітря, низькокипляче робоче тіло, випарник, рециркуляція.

TRIGENERATIVE CIRCULATION EVAPORATIVE CIRCLES OF LOW BOILING WORKING FLUIDS FOR PRECOOLING OF AIR IN DIESELS

R.N. Radchenko

The efficiency of evaporators of waste heat recovery systems, utilizing the heat of exhaust gases to cool the air the intake of discharge compressors of diesels, has been considered. The local heat characteristics along the evaporator-air cooler coils were presented. The schema of waste heat recovery cooling system with recirculation of low boiling working fluid in the evaporator-air cooler by ejector, that provides excluding of the final stage of phase change with extremely low intensity of heat transfer and increase in heat flux as a result, was proposed.

Key words: diesel, trigeneration, heat utilization, exhaust gases, cooling of air, low temperature boiling working fluid, evaporator, recirculation.

Радченко Роман Николаевич – аспирант Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Литература

1. Радченко Р.Н. Обоснование выбора рациональных решений воздухо-охладительных узлов теплоиспользующих установок кондиционирования судовых ДВС / Р.Н. Радченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 9 (45). – С. 31-36.
2. Левитан Л.Л. Кризис высыхания в дисперсно-кольцевом режиме течения / Л.Л. Левитан // *Двухфазные потоки. Теплообмен и гидродинамика*. – Л.: Наука, 1987. – С. 169-186.
3. *Project Guide Two-stroke Engines. MC Programme. Vol. 1.* – Copenhagen, 1986.