УДК 621.436; 621.57

РАДЧЕНКО Р.Н., Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев

ОХЛАЖДЕНИЕ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА НА ВХОДЕ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ВОДОАММИАЧНЫМИ АБСОРБЦИОННЫМИ ХОЛОДИЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

Проаналізовано ефективність застосування водоаміачних абсорбційних холодильних машин, що використовують теплоту відхідних газів для охолодження повітря на вході суднових дизелів.

Application of aqua-ammonia absorption refrigeration systems utilizing heat of exhaust gas for cooling of air at the inlet of marine diesels has been analyzed.

1. Анализ проблемы. Постановка цели и задач исследования

Эффективность судовых дизелей в значительной степени зависит от температуры наружного воздуха и забортной воды. При плавании в южных широтах и в летнее время системы водяного охлаждения не справляются с повышенными тепловыми нагрузками на охладители наддувочного воздуха и не в состоянии нивелировать влияние увеличения температуры воздуха на входе на показатели двигателей, что приводит к возрастанию температуры выхлопных газов и соответствующих потерь теплоты, увеличению теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы. Так, по данным фирмы “MAN-B&W” повышение температуры $t_о$ воздуха на входе судовых двухтактных малооборотных дизелей (МОД) на 10 ºС приводит к возрастанию температуры $t_{у.г}$ уходящих газов после утилизационной турбины наддувочного турбокомпрессора (ТК) примерно на 16 ºС [1]. Увеличиваются также потери с охлаждающей двигатели водой и, в конечном счете, ухудшается топливная экономичность двигателей. По данным [1, 2] каждые 10 ºС повышения температуры $t_о$ воздуха на входе ТК МОД вызывают возрастание удельного расхода топлива b_e на 0,5…0,7 %.

Не меньшее влияние на топливную экономичность судовых дизелей оказывает и температура $t_{зв}$ охлаждающей забортной воды. Согласно данным фирмы “MAN-B&W” каждые 10 ºС повышения температуры воды на входе охладителей наддувочного воздуха судовых МОД вызывают увеличение b_e на 0,6 % [1]. Такое существенное влияние на показатели работы судовых дизелей температур $t_о$ и $t_{зв}$, связанных между собой и отличающихся всего лишь на 2…4 ºС, свидетельствует, во-первых, об ограниченном охлаждающем потенциале забортной воды при повышенных температурах наружного воздуха и, во-вторых, о необходимости применения машинного холода, обеспечивающего охлаждение воздуха на входе ТК и соответственно понижение температуры наддувочного воздуха. Возрастание же температурного уровня вторичных энергоресурсов (ВЭР) – уходящих газов, наддувочного воздуха и охлаждающей двигатели воды – делает целесообразным применение теплоиспользующих холодильных машин (ТХМ).

Известны результаты исследований эффективности применения в качестве ТХМ водоаммиачной абсорбционной холодильной машины (АХМ) [3-6]. Так, в работе [3] рассмотрено применение АХМ, работающей на водяном паре от утилизационного котла ГТД малой мощности ($N_э$ = 100 кВт), для охлаждения воды в системе кондиционирования жилых зданий. Показано, что с учетом производимой тепловой энергии и холода КПД такой тригенерационной ГТУ

повышается от 30 % (электрический КПД) до 70 %. Аналогичное применение АХМ описано и в работе [4], но уже с охлаждением воздуха на входе компрессора ГТД в поверхностном водяном охладителе. При этом охлаждающую воду получают в процессе таяния льда в дневное время, который в свою очередь производят в рассольном испарителе парокомпрессорной холодильной машины, потребляющей электроэнергию в ночное время соответственно по льготному тарифу. В ряде публикаций приведены результаты исследований применения водоаммиачных АХМ, использующих теплоту уходящих газов ГТД для охлаждения воды, подаваемой в поверхностный охладитель воздуха (косвенное охлаждение) на входе в компрессор ГТД или впрыскиваемой непосредственно в воздушный поток (контактное охлаждение). Так, в работе [5] показано, что применение АХМ для предварительного косвенного охлаждения наружного воздуха на входе ГТД LM2500+ и LM1600 (фирмы “General Electric”) от среднегодовой температуры 28…30 ºС до 7 ºС обеспечивает повышение электрической мощности на 20 и 14 % соответственно, а для наиболее напряженных температурных условий 45 ºС максимальное приращение мощности достигает 39 и 33 %. В работе [6] проанализирована эффективность предварительного контактного охлаждения наружного воздуха на входе в компрессор ГТД фирмы “Allison” 501 KH 5, работающей по циклу Чена – с впрыском энергетического пара в камеру сгорания (ГТД типа STIG). Воду, впрыскиваемую в воздушный поток, охлаждали в водоаммиачной АХМ, использующей водяной пар от утилизационного котла ГТД (температура насыщения пара t_s = 135 ºС). Использование теплоты уходящих газов ГТД в бромисто-литиевой АХМ для предварительного охлаждения наружного воздуха на входе с целью повышения мощности и КПД ГТД в теплое время года предложено в работе [7].

Однако все известные исследования связаны с применением АХМ в ГТД, а не дизелей. К тому же в указанных работах тепловой коэффициент водоаммиачных АХМ, представляющий собой отношение холодопроизводительности Q_0 к подведенной тепловой энергии $Q_г$ (теплоте, отведенной от уходящих газов двигателей), $\zeta = Q_0/Q_г$, принимался постоянным, а его изменение в зависимости от параметров ВЭР двигателей и соответственно эффективность применения ТХМ при разных значениях этих параметров и для разных схем утилизации ВЭР двигателей на рассматривались.

Цель исследования – анализ эффективности применения в судовых дизелях водоаммиачных АХМ, использующих теплоту уходящих газов для предварительного охлаждения воздуха на входе в турбонаддувочный компрессор. Для ее достижения решены следующие з***адачи*:** на основе данных практики эксплуатации и стендовых испытаний, представленных ведущими фирмами-изготовителями судовых дизелей в информационных источниках, разработать алгоритм оценки эффективности предварительного охлаждения циклового воздуха двигателей в АХМ с учетом изменения температуры уходящих газов на входе водоаммиачных АХМ; выполнить анализ эффективности применения водоаммиачных АХМ для предварительного охлаждения циклового воздуха на входе судовых дизелей и установить рациональные параметры работы АХМ, обеспечивающие максимальное снижение температуры воздуха.

2. Разработка алгоритма оценки эффективности предварительного охлаждения циклового воздуха дизелей в АХМ с учетом изменения температуры уходящих газов

Поскольку, с одной стороны, холодопроизводительность АХМ, как и всякой ТХМ, зависит от количества теплоты, отведенной от уходящих газов, а с другой, охлаждение воздуха на входе двигателей приводит к снижению температуры $t_{у.г}$ газов на их выходе и соответственному сокращению теплоперепада, срабатываемого в АХМ, то при расчете снижения температуры $\Delta t_в$ воздуха в АХМ необходимо учитывать взаимную зависимость $t_о$ и $t_{у.г}$. На основе данных [1] принимаем для МОД фирмы “MAN-B&W” соотношение $\Delta t_{у.г}$ = 1,6 $\Delta t_в$. Это означает, что при повышении температуры $t_о$ воздуха на входе в двигатель, например на 20 ºС, температура уходящих газов увеличится на 32 ºС. Если принять за спецификационный режим работу МОД при температуре $t_о$ = 25 ºС и $t_{у.г}$ = 250 ºС [1], то при эксплуатации двигателя при повышенной температуре воздуха на входе двигателя, например $t_о$ = 45 ºС (воздух в машинном отделении), с учетом указанной выше пропорции температура газов на выходе МОД (на входе в генератор АХМ) будет составлять $t_{у.г}$ = 282 ºС. Теплота, отведенная от уходящих газов в генераторе АХМ, используется для охлаждения в испарителе АХМ воздуха на входе двигателя. Из-за снижения температуры $t_о$ воздуха на входе двигателя на величину $\Delta t_в$ значения температуры уходящих газов на входе генератора АХМ $t_{у.г}$ окажутся уже ниже исходной величины $t_{у.г}$ = 282 ºС и будут находиться методом последовательных приближений с учетом указанной выше пропорции $\Delta t_{у.г}$ = 1,6 $\Delta t_в$ и холодопроизводительности АХМ, определяемой тепловым коэффициентом ζ. При этом учитывают зависимость теплового коэффициента ζ от температуры кипения водоаммиачного раствора в генераторе $t_г$, аммиака в испарителе-воздухоохладителе t_0 и конденсации аммиака $t_к$. Минимальное значение разности температур воздуха на выходе из испарителя АХМ (на входе

в двигатель) $t_{в2}$ и кипящего в испарителе аммиака t_0 определяется интенсивностью теплопередачи и составляет $\Delta t_{в/0} = t_{в2} - t_0 = 10…15$ ºС.

3. Анализ эффективности предварительного охлаждения воздуха судовых дизелей в АХМ

С целью определения максимальных значений снижения температуры воздуха на входе ТК, а соответственно и приращения КПД двигателей, а также условий их достижения, и прежде всего значений температуры $t_г$ кипения аммиака в генераторе АХМ, был выполнен комплекс расчетов, результаты которых представлены ниже.

Температура уходящих газов после генератора составляла $t_{г2}$ = 150 ºС, кипения аммиака в испарителе t_0 = 0 и 10 ºС, конденсации $t_к$ = 30 ºС. Температура уходящих газов после двигателя принималась равной $t_{у.г}$ = 280 ºС при температуре воздуха на его входе $t_о$ = 45 ºС, что соответствовало параметрам эксплуатации МОД фирмы “MAN-B&W”: $t_{у.г}$ = 250 ºС при спецификационных условиях $t_о$ = 25 ºС [1]. Значения температуры уходящих газов в случае применения АХМ для предварительного охлаждения воздуха (температуры $t_{у.г}$ газов перед генератором АХМ) рассчитывались в зависимости от величины теплового коэффициента ζ методом последовательных приближений в соответствии с приведенным выше алгоритмом. В свою очередь, тепловой коэффициент ζ определялся в зависимости от температуры кипения водоаммиачного раствора в генераторе $t_г$, аммиака в испарителе t_0 и конденсации аммиака $t_к$ (рис. 1).

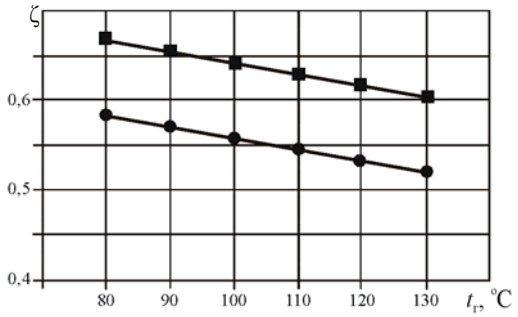

Рис. 1. Зависимость теплового коэффициента АХМ ζ от температуры кипения водоаммиачного раствора в генераторе $t_г$ при температурах конденсации $t_к$ = 30 ºС и кипения в испарителе t_0: ■ – t_0 = 10 ºС; ● – t_0 = 0 ºС

Значения удельной теплоты, приходящейся на единичный расход газа или воздуха, отведенной от уходящих газов $q_г$, от воздуха на входе ДВС q_0, снижения температуры $\Delta t_в$ воздуха на входе ДВС, теплового коэффициента АХМ ζ в зависимости от температуры уходящих газов на входе в генератор АХМ $t_{у.г}$ при температуре кипения водоаммиачного раствора в генераторе $t_г$ = 80…100 ºС, температуре кипения аммиака в испарителе t_0 = 0 °С, конденсации аммиака $t_к$ = 30 ºС, уходящих газов после генератора АХМ $t_{г2}$ = 150 °С представлены на рис. 2. При этом значения температуры уходящих газов на входе в генератор АХМ $t_{у.г}$ рассчитывали методом последовательных приближений, исходя из исходной температуры уходящих газов на входе в генератор АХМ для базового варианта ДВС (без АХМ) $t_{у.г}^б$ = 200 °С с учетом соотношения между снижениями температур уходящих газов и наружного воздуха на входе ДВС: $\Delta t_{у.г} = 1{,}6\ \Delta t_в$ [1].

Как видно, во всем диапазоне практически реальных значений температуры кипения водоаммиачного раствора в генераторе $t_г$ = 80…120 ºС при температуре уходящих газов для базового двигателя (без АХМ) $t_{у.г}^б$ = 200 °С величина снижения температуры $\Delta t_в$ воздуха в испарителе АХМ оказывается несколько выше $\Delta t_в$ = 15 ºС. Следствием охлаждения воздуха на входе ДВС на величину $\Delta t_в$ = 15 ºС является и более низкое (по сравнению с $t_{у.г}^б$ = 200 °С) значение температуры газов на входе в генератор АХМ $t_{у.г}$ = 175 ºС, которое связано с $\Delta t_в$ приведенным выше соотношением: $\Delta t_{у.г} = 1{,}6\ \Delta t_в$ [1]. Из этого видно, что сравнительно небольшое снижение температуры воздуха в испарителе АХМ, $\Delta t_в$ = 15 ºС, обусловлено небольшой располагаемой разностью температур по уходящим газам, $\Delta t_р = t_{у.г} - t_{г2}$ = (175 – 150) ºС = 25 ºС, соответственно и срабатываемым в АХМ теплоперепадом. Расчеты показывают, что в случае $t_{у.г}^б$ = 280 °С снижение температуры воздуха в испарителе АХМ оказывается гораздо выше: $\Delta t_в$ = 40 ºС. При этом и располагаемая разность температур по уходящим газам намного больше $\Delta t_р = t_{у.г} - t_{г2}$ = (215 – 150) ºС = 65 ºС.

Слабое изменение снижения температуры воздуха в испарителе АХМ $\Delta t_в$ во всем практическом диапазоне изменения температуры кипения водоаммиачного раствора в генераторе АХМ $t_г$ дает возможность принимать меньшие значения $t_г$, чтобы обеспечить максимальные температурный напор θ и соответственно плотность теплового потока q_F, т.е. минимальную поверхность генератора-десорбера аммиака.

На рис. 3 приведены значения удельной теплоты, отведенной от уходящих газов $q_г$, от

воздуха на входе двигателя q_0, снижения температуры $\Delta t_в$ воздуха в испарителе АХМ, приращения КПД двигателя $\Delta\eta$, температуры уходящих газов на входе в генератор АХМ $t_{у.г}$ при разной температуре уходящих газов для базового ДВС (без АХМ) $t_{у.г}^б$, температурах кипения водоаммиачного раствора в генераторе $t_г$ = 120 °С и испарителе t_0 = 0 °С (рис. 3, ***а***) и 10 °С (рис. 3, ***б***).

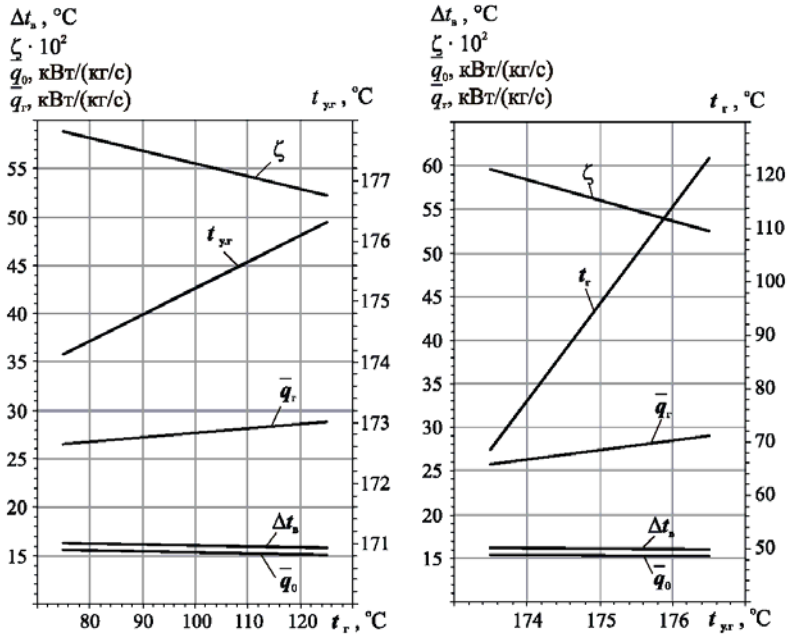

Рис. 2. Зависимости удельной теплоты, отведенной от уходящих газов $q_г$, от воздуха на входе двигателя q_0, снижения температуры $\Delta t_в$ воздуха на входе двигателя, теплового коэффициента АХМ ζ и температуры кипения водоаммиачного раствора в генераторе $t_г$ от температуры уходящих газов на входе в генератор АХМ $t_{у.г}$ при температуре воздуха на входе базового двигателя (без АХМ) $t_{в1}^б$ = 45 °С и уходящих газов $t_{у.г}^б$ = 200 °С

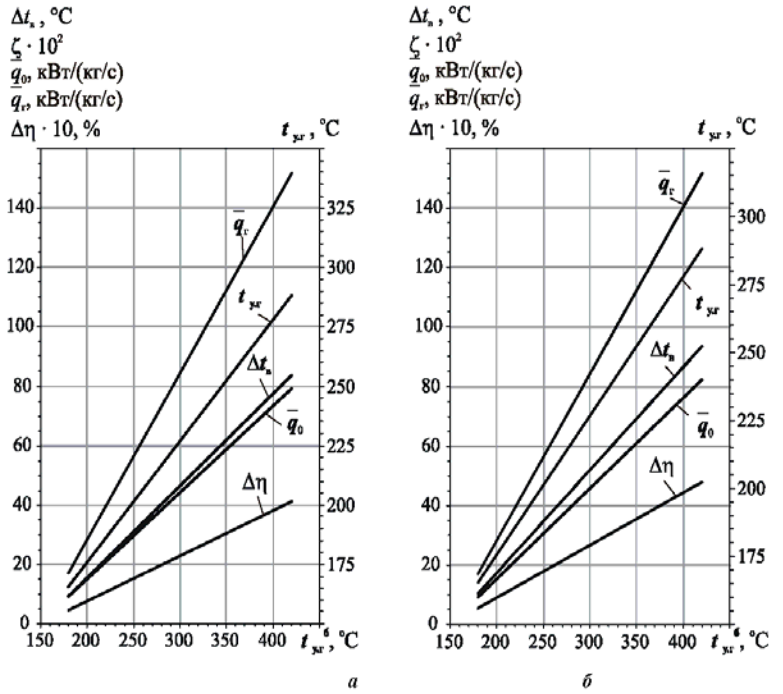

Рис. 3. Зависимости удельной теплоты, отведенной от уходящих газов $q_г$, от воздуха на входе двигателя q_0, снижения температуры $\Delta t_в$ воздуха в испарителе АХМ, приращения КПД двигателя $\Delta\eta$, температуры уходящих газов на входе в генератор АХМ $t_{у.г}$ от температуры уходящих газов для базового двигателя (без АХМ) $t_{у.г}^б$ при $t_г$ = 120 °С: *а* – t_0 = 0 °С; *б* – t_0 = 10 °С

Из рис. 3, ***а*** видно, что при t_0 = 0 °С во всем диапазоне возможных значений температуры уходящих газов для базового двигателя (без АХМ) $t_{у.г}^{б}$ от 180 °С (уходящие газы после утилизационного котла) до 400 °С (уходящие газы после средне- и высокооборотных дизелей) снижение температуры воздуха в испарителе-воздухоохладителе АХМ составляет $\Delta t_в$ = 10…80 °С. Приращение КПД двигателей в результате снижения температуры воздуха на входе рассчитывали в соответствии с данными для МОД фирмы "MAN-B&W" [1, 2], согласно которым уменьшение температуры $\Delta t_в$ воздуха на входе на 10 °С приводит к увеличению КПД двигателя на 0,5 %. Понятно, что такая большая величина $\Delta t_в$ может быть реализована в случае охлаждения не только воздуха на входе двигателя (перед ТК), но и наддувочного воздуха (после ТК).

Следует отметить, что при t_0 = 0 °С и $t_{у.г}^{б}$ = 250 °С снижению температуры воздуха на входе двигателя на величину $\Delta t_в$ = 35 °С (см. рис. 3, ***а***) по сравнению с исходной его температурой, например 45 °С (температурой воздуха в машинном отделении) будет соответствовать его температура после испарителя АХМ $t_{в2}$ = 10 °С, значит и разность температур между охлаждаемым воздухом и кипящим аммиаком на выходе из испарителя будет $\Delta t_{в/0} = t_{в2} - t_0$ = 10 °С, т.е. минимально возможной, исходя из интенсивности теплопередачи. Однако при t_0 = 10 °С (рис. 3, ***б***) снижение температуры воздуха составляет $\Delta t_в$ = 40 °С. Такая большая величина $\Delta t_в$ может быть реализована полностью только при исходной температуре воздуха на входе не t_0 = 45 °С, а уже, как минимум, t_0 = 60…65 °С. В случае же t_0 = 45 °С температуре воздуха на входе может быть понижена лишь до значений $t_{в2}$ = 20…25 °С (при t_0 = 10 °С), т.е. на $\Delta t_в$ = 20…25 °С, что соответствует только 50…60 % от потенциально возможного снижения температуры $\Delta t_в$ = 40 °С. Избыточный холод целесообразно использовать для глубокого охлаждения наддувочного воздуха.

При более высокой температуре кипения t_0 = 10 °С (рис. 3, ***б***) и приращение КПД $\Delta\eta$ будет выше: на 0,07 при $t_{у.г}^{б}$ = 400 °С, т.е. на 15…20 % по сравнению с $\Delta\eta \approx$ 0,4 при t_0 = 0 °С (рис. 3, ***а***). Однако следует учитывать, что такой большой эффект от применения АХМ может быть достигнут только в случае эксплуатации двигателей при высоких температурах окружающей среды (воздуха и забортной воды) и использовании холода для охлаждения как наружного воздуха на входе, так и наддувочного воздуха, когда системы водяного охлаждения не справляются с повышенной нагрузкой.

Выводы

1. Разработан алгоритм расчета параметров теплоиспользующей системы предварительного охлаждения циклового воздуха судовых дизелей в АХМ с учетом зависимости температуры уходящих газов от температуры воздуха на входе двигателей.
2. Установлено, что использование теплоты уходящих газов МОД в АХМ обеспечивает охлаждение их циклового воздуха на 15…40 °С (меньшая величина относится к утилизации теплоты газов после утилизационного парово-дяного котла, большая – газов после турбокомпрессора) с соответствующим приращением КПД двигателей $\Delta\eta$ на 1…3 % по сравнению с базовым вариантом работы МОД без АХМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, 2005. – 15 p. – http://www.mandiesel.com/files/news/filesof762/5510-0005.00pr_low.pdf.
2. Project Guide Two-stroke Engines. MC Programme. Vol. 1. – Copenhagen, 1986.
3. Campanary S., Macchi E. Technical and tariff scenarios effect on microturbine trigenerative applications air // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2003. – Paper GT-2003-38275. – 11 p.
4. Yokoyama R., Ito K. Effect of inlet air cooling by ice storage on unit sizing of a gas turbine cogeneration plant air // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2002-30484. – 8 p.
5. Bortmany J.N. Assessment of aqua-ammonia refrigeration for pre-cooling gas turbine inlet air // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2002-30657. – 12 p.
6. Nixdorf M., Prelipceanu A., Hein D. Thermo-economic analysis of inlet air conditioning methods of a cogeneration gas turbine plant // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2002-30561. – 10 p.
7. Кузьмина Т.Г., Тесля Е.С. О повышении мощности и кпд ГТД в теплое время года // Газотурбинные технологии. – № 1. – 2008. – С. 16-18.

Надійшла до редколегії 24.03.07.