

УДК 621.577

А.Н. РАДЧЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ЭЖЕКЦИОННАЯ СИСТЕМА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА И ЗОНАЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ СУДОВОГО МАШИННОГО ОТДЕЛЕНИЯ

Предложены эффективные эжекционные системы воздушного охлаждения электрогенераторов и локальной вентиляции судового машинного отделения в зонах расположения дизель-генераторов с повышенной интенсивностью тепловыделения. Циркуляция воздуха в эжекционных системах осуществляется за счет энергии выпускных газов приводного дизеля. При этом исключаются энергетические затраты на циркуляцию вентиляционного воздуха. Эжекционные системы могут применяться для вентиляции электрогенератора воздухом из машинного отделения и с его охлаждением теплоиспользующей холодильной машины. Приведены напорно-циркуляционные характеристики эжекционных устройств и схемные решения эжекционных систем.

Ключевые слова: вентиляция, эжекция, электрогенератор, дизель-генератор, утилизация, выпускные газы, напор.

Анализ проблемы и постановка цели исследования

Выход из строя обмоток электрогенераторов (ЭГ) судовых дизель-генераторов (ДГ) из-за перегрева является в большинстве случаев основной причиной их отказов при плавании в теплое время и тропических широтах [3, 5]. Чтобы избежать этого, применяют в большинстве случаев охлаждение обмоток наружным воздухом (вентиляцию).

Энергетические затраты на циркуляцию вентиляционного воздуха через ЭГ составляют 2...3 % производимой электроэнергии [1]. Они особенно значительны при высоких температурах наружного воздуха и, соответственно, в машинном отделении (МО), а значит и на входе наддувочного турбокомпрессора (ТК) приводного дизеля, когда из-за возрастания работы сжатия и уменьшения подачи воздуха в цилиндры, а также увеличения потерь теплоты с уходящими газами снижается топливная эффективность приводного дизеля (возрастает удельный расход топлива b_e). Так, с повышением температуры воздуха на входе ТК дизелей на 10 °С удельный расход топлива дизелей b_e увеличивается на 0,5...0,7 % [4, 6]. Столь существенная зависимость эффективности эксплуатации ЭГ и ДГ в целом от температуры воздуха на входе остро ставит проблему сокращения затрат на циркуляцию воздуха через ЭГ и обеспечение надежной вентиляции МО с поддержанием температуры воздуха в нем на приемлемом уровне.

Основными источниками тепловыделений в МО являются главный двигатель (чаще всего малооборотный дизель – МОД) и ДГ, причем последние

по удельным, приходящимся на единицу объема, тепловым потокам значительно превосходят таковые от МОД, что требует интенсивного отвода теплоты из зон расположения ДГ, т.е. повышенного воздухообмена в этих зонах. Поэтому интенсивная зональная вентиляция МО – одно из перспективных направлений решения проблемы.

Цель работы – разработка эффективной, с минимальными энергетическими затратами на циркуляцию, системы воздушного охлаждения ЭГ и зональной вентиляции судового МО.

Изложение результатов исследования

Традиционно системы воздушного охлаждения ЭГ и воздухообеспечения (соответственно и газовой хлопа) приводного дизеля функционируют независимо друг от друга (рис. 1). При этом имеют место интенсивные тепловыделения от приводного дизеля и ЭГ, включая и с нагретым вентиляционным воздухом, отводимым от ЭГ непосредственно в МО. Наряду с тепловыделениями от главного двигателя это приводит к тому, что при плавании судна в южных широтах и в летнее время температура воздуха в МО даже при условии нормальной его вентиляции примерно на 10 °С выше наружной [6].

В свою очередь, из-за высокой температуры воздуха в МО требуются большие его расходы на вентиляцию ЭГ, которые обычно составляют 30...50 % расхода воздуха через приводной дизель. В современных дизелях применяется свободный турбонаддув, при котором наддувочный компрессор приводится от турбины, использующей энергию уходящих газов дизеля. Турбина турбокомпрессора (ТК) на рис. 1 не показана.

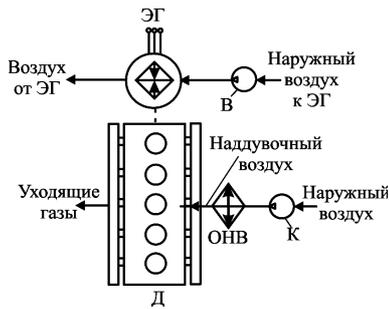


Рис. 1. Схема традиционных систем воздушного охлаждения ЭГ и подачи воздуха в приводной дизель: Д – приводной дизель; К – наддувочный компрессор; ОНВ – охладитель наддувочного воздуха водяной; В – вентилятор

Поскольку при высоких температурах воздуха на входе наддувочного ТК приводного дизеля (воздуха в МО) возрастает температура $t_{уг}$ уходящих газов после турбины ТК, то представляется целесообразным использовать энергию уходящих газов для циркуляции воздуха через ЭГ и локальной вентиляции МО (в зоне ДГ) с помощью струйного аппарата – эжектора. Эжекционная система воздушного охлаждения ЭГ и локальной вентиляции МО (в зоне расположения ДГ) представлена на рис. 2.

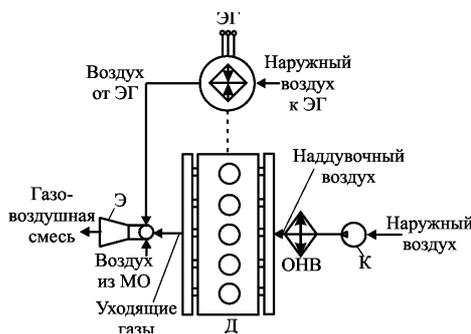


Рис. 2. Схема эжекционной системы воздушного охлаждения ЭГ и локальной вентиляции МО в зоне ДГ: Д – приводной дизель; Э – эжектор; К – наддувочный компрессор; ОНВ – охладитель наддувочного воздуха водяной

В рабочее сопло эжектора подают уходящие газы после ТК, например, для среднеоборотного дизеля (СОД) с температурой $t_{уг} = 350...400$ °С и избыточным давлением (рабочим) $P_p = 2000...3000$ Па. В результате расширения газов в сопле их скорость и, следовательно, кинетическая энергия на выходе из сопла резко увеличиваются. Энергия газов используется для всасывания (эжектирования) вентиляционного воздуха из ЭГ и прилегающей зоны расположения ДГ с интенсивным тепловыделением.

При смешении рабочего газового потока и эжектируемого (нерабочего) воздушного потока в результате выравнивания их скоростей давление газовой смеси возрастает сначала в камере смешения и окончательно – в диффузоре эжектора. Суммарный

напор газовой смеси ΔP_c , создаваемый эжектором, расходуется на преодоление аэродинамического сопротивления отводящего газовой смеси тракта.

Эжектирующая способность эжектора характеризуется коэффициентом эжекции U , представляющим собой отношение расходов эжектируемого (нерабочего) воздушного потока после ЭГ и силового (рабочего) потока уходящих газов приводного дизеля: $U = G_n / G_p$. На рис. 3 представлены зависимости коэффициента эжекции U от создаваемого эжектором напора (избыточного давления) ΔP_c газовой смеси при разной рабочей разности давлений ΔP_p , срабатываемой в сопле, и температурах уходящих газов СОД $t_{уг} = 350$ °С.

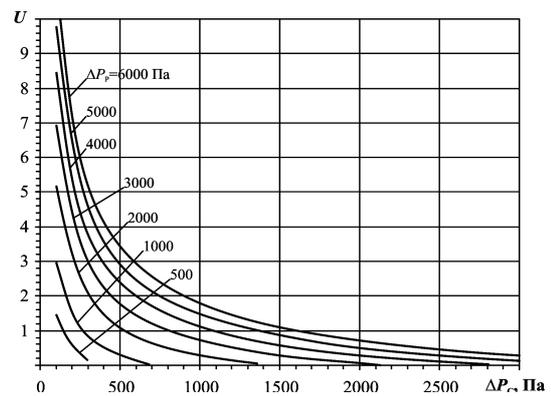


Рис. 3. Коэффициенты эжекции U в зависимости от создаваемого эжектором напора ΔP_c газовой смеси при разной рабочей разности давлений ΔP_p и температуре уходящих газов дизеля $t_{уг} = 350$ °С

Как видно, при рабочей разности давлений газов ΔP_p , срабатываемой в сопле эжектора, т. е. располагаемом избыточном давлении уходящих газов после ТК приводного дизеля, $\Delta P_p = 3000$ Па, эжектор в состоянии создавать избыточное давление газовой смеси $\Delta P_c = 1000$ Па, достаточное для преодоления аэродинамического сопротивления выпускного газовой смеси тракта, обеспечивая при этом коэффициент эжекции $U = 0,8$ и соответствующий расход эжектируемого (нерабочего) воздушного потока $G_n = U G_p = 0,8 G_p$.

При расходах вентиляционного воздуха ЭГ 30...50 % от расхода уходящих газов приводного дизеля, т. е. $G_n = (0,3...0,5) G_p$ и соответственно требуемых для вентиляции ЭГ коэффициентах эжекции $U_{ЭГ} = 0,3...0,5$, создаваемых эжектором коэффициентах эжекции достаточно ($U = 0,8 > U_{ЭГ}$), чтобы обеспечить вентиляцию ЭГ и прилегающих зон МО. При этом исключаются энергетические затраты на циркуляцию вентиляционного воздуха ЭГ, составляющие 2...3 % электрической мощности ДГ [1], и зон наиболее интенсивного тепловыделения.

Для обеспечения отвода теплоты от нескольких источников тепловыделения эжекционная система может включать несколько эжекторов.

Ухудшение топливной эффективности приводного дизеля с повышением температуры воздуха на входе ТК (увеличение удельного расхода топлива b_c) и возрастание потерь теплоты с уходящими газами делает целесообразным охлаждение воздуха на входе ТК дизеля в теплоиспользующей холодильной машине (ТХМ) за счет утилизации теплоты газов [2]. В этом случае возможна комбинация эжекционной системы вентиляции ЭГ и МО с такой ТХМ.

Конструктивно наиболее простыми и надежными в эксплуатации являются ТХМ эжекторного типа (ТЭХМ), в которых функцию компрессора выполняет эжектор [2]. Применение в ТЭХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ), например хладонов, позволяет охлаждать воздух до низких температур, 15 °С и ниже, причем без необходимости поддержания вакуума в испарителе НРТ – охладителе воздуха.

Схема комбинированной эжекционной системы вентиляции и ТЭХМ, утилизирующей теплоту уходящих газов приводного дизеля для охлаждения воздуха на входе ТК дизеля и ЭГ приведена на рис. 3, а. С целью упрощения на рис. 3, а опущен контур пароводяного утилизационного котла, к паровой магистрали которого подключают генератор парообразного хладона, а генератор условно показан на линии уходящих газов. ТЭХМ включает паросиловой и холодильный контуры. Паросиловой контур служит для получения паров хладона высокого давления, потенциальная энергия которых используется в эжекторе для повышения давления паров хладона, образующихся в результате кипения хладона при низком давлении в испарителе-воздухоохладителе (И-ВО) холодильного контура. Суммарный паровой поток подается эжектором в конденсатор. Сконденсировавшийся

хладон делится на два потока: первый – подается насосом в генератор, где он нагревается и испаряется за счет теплоты выпускных газов приводного дизеля, а второй – дросселируется в дроссельном клапане и направляется в И-ВО, где испаряется при низком давлении и соответственно температуре, отводя теплоту от вентиляционного воздуха на входе ЭГ и воздуха на входе наддувочного компрессора дизеля. Эжектор совмещает функции детандера паросилового контура (расширение пара происходит в его сопле) и компрессора холодильного контура (повышение давления пара, всасываемого из И-ВО, происходит в его камере смешения и диффузоре).

Использование теплоты уходящих газов в ТЭХМ приводит к снижению температуры газов на входе в газозвушной эжектор от 350 до 150 °С и некоторому ухудшению его напорно-циркуляционной характеристики $U = f(\Delta P_c)$.

Напорно-циркуляционная характеристика газозвушного эжектора в виде зависимости коэффициента эжекции U от напора эжектора ΔP_c при разной рабочей разности давлений газов ΔP_p в сопле и температуре уходящих газов дизеля после отвода от них теплоты в генераторе ТЭХМ $t_{гр} = 150$ °С представлена на рис. 4, б.

Из рис. 4, а видно, что при температуре уходящих газов на входе в рабочее сопло эжектора $t_{гр} = 150$ °С кривые напорно-циркуляционной характеристики эжектора $U = f(\Delta P_c)$ снижаются более резко (по сравнению с $t_{гр} = 350$ °С на рис. 3). В результате при срабатываемой в сопле разности давлений газов $\Delta P_p = 3000$ Па и напоре (избыточном давлении газозвушной смеси) $\Delta P_c = 1000$ Па коэффициенты эжекции несколько ниже: $U = 0,6 \dots 0,7$.

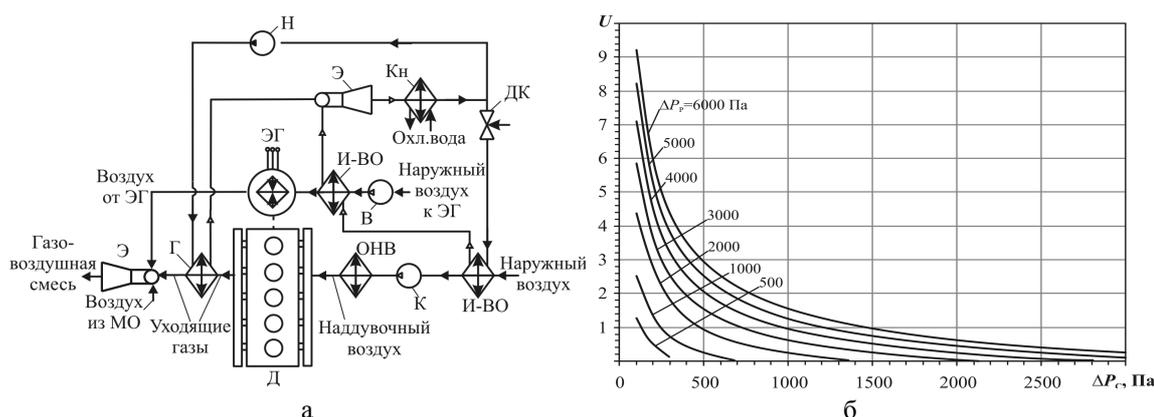


Рис. 4. Схема комбинированной эжекционной системы вентиляции ЭГ и соответствующей зоны МО с охлаждением воздуха на входе ЭГ и приводного дизеля в ТЭХМ: эжекционной системы охлаждения вентиляционного воздуха ЭГ и воздуха на входе приводного дизеля с помощью ТЭХМ (а) и напорно-циркуляционная характеристика газозвушного эжектора в виде зависимости коэффициента эжекции U от создаваемого напора ΔP_c при разной рабочей разности давлений ΔP_p в сопле и температуре уходящих газов после ТЭХМ $t_{гр} = 150$ °С: ОНВ – охладитель наддувочного воздуха водяной; К – наддувочный компрессор; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель; Г – генератор ТЭХМ; Э – эжектор; Кн – конденсатор; Н – насос хладона; ДК – дроссельный клапан

Однако следует учитывать, что при этом на вход в ЭГ подается не воздух из МО с температурой 40...45 °С (тропические условия плавания), как в системах вентиляции на рис. 1 и 2, а воздух, охлажденный в ТЭХМ примерно до 15...20 °С, которого требуется соответственно в 2...3 раза меньше, а значит и меньше требуемые U.

Такая многоцелевая комбинированная эжекционная система обеспечивает комплексное охлаждение воздуха на входе ТК и ЭГ и зональную вентиляцию МО. При необходимости в зонах источников интенсивного тепловыделения могут быть размещены воздухоохладители И-ВО, что обеспечит не только вентиляцию, но и охлаждение воздуха в них. Поскольку такие системы состоят в основном из теплообменников, то их применение не вызовет снижения надежности эксплуатации судовой энергетической установки.

Выводы

Предложены эффективные эжекционные системы воздушного охлаждения электрогенераторов и локальной вентиляции судового машинного отделения в зонах расположения дизель-генераторов с повышенной интенсивностью тепловыделения, использующие для циркуляции воздуха энергию выпускных газов приводного дизеля. Получены напорно-циркуляционные характеристики систем.

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

ЕЖЕКЦІЙНА СИСТЕМА ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА ТА ЗОНАЛЬНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ СУДОВОГО МАШИНОГО ВІДДІЛЕННЯ

А.М. Радченко

Запропоновані ефективні ежекційні системи повітряного охолодження електрогенераторів і локальної вентиляції судового машинного відділення в зонах розташування дизель-генераторів із підвищеною інтенсивністю тепловиділення. Циркуляція повітря в ежекційних системах здійснюється за рахунок енергії відхідних газів приводного дизеля. При цьому вилучаються енергетичні витрати на циркуляцію вентиляційного повітря. Ежекційні системи можуть застосовуватись для вентиляції електрогенератора повітрям із машинного відділення та з його охолодженням тепловикористовуючою холодильною машиною. Наведені напірно-циркуляційні характеристики ежекційних пристроїв і схемні рішення ежекційних систем.

Ключові слова: вентиляція, ежекція, електрогенератор, дизель-генератор, утилізація, відхідні гази, напір.

EJECTIVE SYSTEM FOR AIR COOLING OF ALTERNATOR AND ZONAL VENTILATION OF SHIP ENGINE ROOM

A.N. Radchenko

The efficient ejective systems for air cooling of alternators and local ventilation of ship engine room in the zones of diesel-generator displacement with increased intensity of heat emission. The circulation of air in ejective systems is performed by using the energy of exhaust gases of driving diesel engine. With this the circulation of ventilation air is performed without of energy consumption. Ejective systems can be applied for ventilation of alternator with air from the ship engine room and air cooled by waste heat recovery cooling machine. The pressure-circulation characteristics of ejective devises and schemes of ejective systems are presented.

Key words: ventilation, ejection, alternator, diesel, diesel-generator, utilization, exhaust gases, pressure increase.

Радченко Андрей Николаевич – канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Литература

1. Борисенко А.И. *Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах* / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
2. Радченко А.Н. *Анализ эффективности комплексного охлаждения воздуха дизель-генераторов теплоиспользующими установками* / А.Н. Радченко // *Зб. наук. праць НУК.* – 2009. – Вип. 1 (424). – С. 130–136.
3. *Справочник по электрическим машинам: В 2 т.* / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
4. Суворов П.С. *Управление режимами работы главных судовых двигателей* / П.С. Суворов. – Одесса: ЛАТСТАР, 2000. – 238 с.
5. Сюбаев М.А. *Анализ аварий и неисправностей в судовых электроустановках* / М.А. Сюбаев, А.Б. Хайкин, Е.А. Шейнцев. – Л.: Судостроение, 1975. – 176 с.
6. *Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation.* – Copenhagen, Denmark: MAN B&W Diesel A/S, 2005. – 15 p.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований по Гранту Президента Украины (проект № GP/F32/152).

Поступила в редакцию 12.05.2011