

УДК 621.577

А.Н. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, А. СТАХЕЛЬ<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина<sup>2</sup>Западно-Померанский технологический университет, Польша

## ЭЖЕКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ СУДОВОГО ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА

*Предложены эффективные системы эжекционных вентиляции судового электрогенератора и кондиционирования вентиляционного воздуха. Эжекционные системы могут применяться для вентиляции электрогенератора наружным воздухом как простейшего варианта кондиционирования воздуха, а также для кондиционирования вентиляционного воздуха судового электрогенератора с его охлаждением теплоиспользующей холодильной машиной. Циркуляция воздуха в эжекционных системах осуществляется за счет энергии выпускных газов приводного дизеля. При этом исключаются энергетические затраты на циркуляцию вентиляционного воздуха. Приведены напорно-циркуляционные характеристики эжекционных устройств и схемные решения эжекционных систем.*

**Ключевые слова:** кондиционирование, вентиляция, эжекция, электрогенератор, дизель, утилизация, выпускные газы, напор.

### Анализ проблемы и постановка цели исследования

Мощность электрогенераторов (ЭГ) ограничивается температурой их обмоток, которая с увеличением температуры вентиляционного воздуха на 2...3 °С возрастает на 1 °С [1]. С повышением температуры изоляции на 8...10 °С сверх установленной нормы срок ее службы сокращается в два раза [1]. Именно выход из строя обмоток ЭГ из-за перегрева является в большинстве случаев основной причиной отказов ЭГ судовых дизель-генераторов (ДГ) при плавании в южных широтах [3, 4]. Чтобы избежать этого, применяют систему кондиционирования воздуха. Самый простой вариант – это отвод выделяющейся в обмотках ЭГ теплоты циркулирующим через ЭГ наружным воздухом, т. е. вентиляция ЭГ. Более эффективный метод – циркуляция через ЭГ воздуха, предварительно охлажденного, например, в холодильной машине.

Энергетические затраты на циркуляцию воздуха через ЭГ весьма значительные и для случая вентиляции ЭГ составляют 2...3 % вырабатываемой электроэнергии [1]. Особенно значительны затраты на циркуляцию воздуха при высоких его температурах, имеющих место при плавании судов в южных широтах и в летнее время.

**Цель работы** – сокращение энергетических затрат на циркуляцию воздуха в системах вентиляции ЭГ и кондиционирования вентиляционного воздуха.

### Изложение результатов исследования

При плавании судна в южных широтах и в летнее время температура наружного воздуха достаточно высокая, а в случае вентиляции ЭГ воздухом из машинного отделения (МО) его температура выше наружной еще на 10 °С [5], что требует больших расходов вентиляционного воздуха для отвода теплоты, выделяющейся в обмотках ЭГ. Обычно расход вентиляционного воздуха ЭГ составляет 30...50 % расхода воздуха через приводной дизель. С повышением температуры воздуха на входе приводного дизеля снижается термодинамическая эффективность и самого дизеля: возрастает температура  $t_{гг}$  уходящих газов после турбины наддувочного турбокомпрессора (ТК) и, следовательно, потери теплоты с ними, что приводит к увеличению удельного расхода топлива. Поэтому представляется целесообразным использовать энергию уходящих газов для циркуляции воздуха через ЭГ с помощью струйного аппарата – эжектора.

Эжекционная система вентиляции ЭГ представлена на рис. 1. Там же вместе с системой вентиляции ЭГ показана и система воздухообеспечения приводного дизеля. Последняя включает наддувочный компрессор и водяной охладитель наддувочного воздуха (ОНВ). В современных дизелях применяется, как правило, свободный турбонаддув, при котором наддувочный компрессор приводится от турбины, использующей энергию уходящих газов дизеля (на рис. 1 турбина ТК не показана).

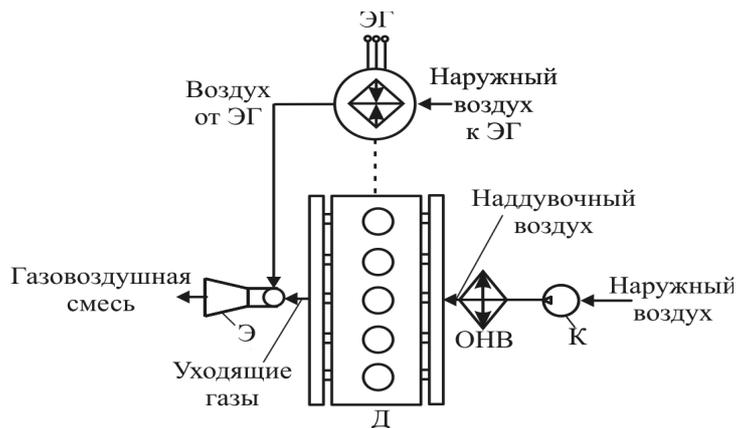


Рис. 1. Схема эжекционной системы вентиляции ЭГ и подачи воздуха в приводной дизель:

Д – приводной дизель; К – наддувочный компрессор;  
 ОНВ – водяной охладитель наддувочного воздуха

Уходящие газы после ТК с температурой  $t_{гр} = 350 \dots 450 \text{ }^\circ\text{C}$  (меньшее значение соответствует среднеоборотным дизелям, большее – высокооборотным) и избыточным рабочим давлением  $\Delta P_p = 6000 \dots 500 \text{ Па}$  (большая величина соответствует максимальному допускаемому сопротивлению газовыхлопа дизеля) подаются в рабочее сопло эжектора. В результате расширения газов в сопле их скорость и, следовательно, кинетическая энергия на выходе из сопла увеличиваются. Кинетическая энергия газов используется для всасывания (эжектирования) вентиляционного воздуха из ЭГ, что позволяет отказаться от вентилятора и, соответственно, исключить энергетические затраты на вентиляцию ЭГ.

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  $\Delta P_c$ , создаваемый эжектором, расходуется на преодоление аэродинамического сопротивления газовыпускного тракта приводного дизеля.

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. 2 представлены зависимости коэффициента эжекции  $U$  от создаваемого эжектором напора ( $\Delta P_c$  избыточного давления) газовой смеси при разной рабочей разности давлений  $\Delta P_p$ , срабатываемой в сопле, и температуре уходящих газов после ТК  $t_{гр} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ , соответствующей среднеоборотным дизелям (СОД).

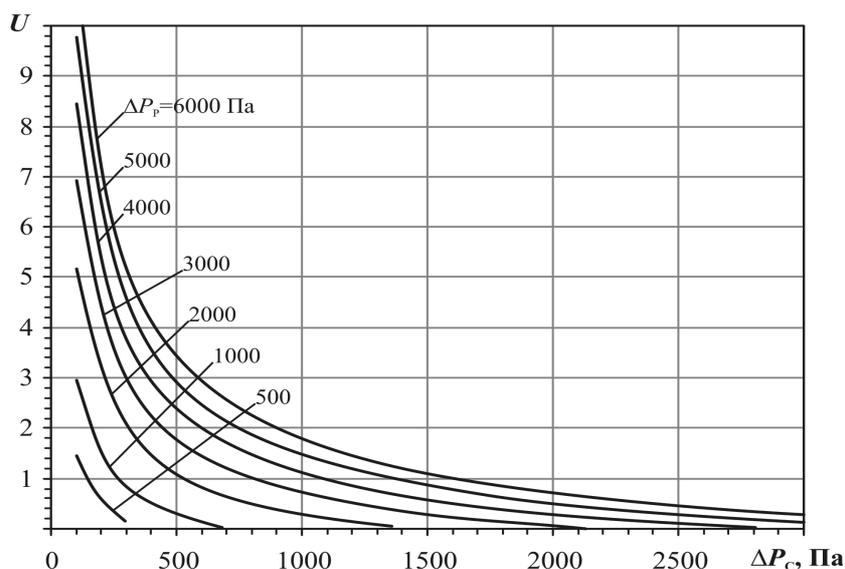


Рис. 2. Коэффициенты эжекции  $U$  в зависимости от создаваемого эжектором напора  $\Delta P_c$  газовой смеси при разной разности давлений  $\Delta P_p$ , срабатываемой в сопле, и температуре уходящих газов дизеля  $t_{гр} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$

Как видно, при рабочей разности давлений газов  $\Delta P_p$ , срабатываемой в сопле эжектора, т. е. избыточном рабочем давлении уходящих газов после ТК приводного дизеля,  $\Delta P_p = 3000 \dots 4000$  Па, эжектор в состоянии создавать напор (избыточного давления) газозвушной смеси  $\Delta P_c = 1000$  Па, достаточный для преодоления аэродинамического сопротивления газовыпускного тракта. При этом коэффициенты эжекции  $U = 0,7 \dots 1,1$ . При расходах вентиляционного воздуха ЭГ, составляющих 30...50 % расхода уходящих газов приводного дизеля, т. е.  $G_n = U G_p = (0,3 \dots 0,5) G_p$ , создаваемых эжектором коэффициентов эжекции достаточно, чтобы обойтись без вентилятора, т. е. исключить затраты на циркуляцию вентиляционного воздуха ЭГ, которые составляют 2...3 % электрической мощности ДГ [1].

Возможна также комбинация эжекционной системы вентиляции ЭГ и системы охлаждения вентиляционного воздуха ЭГ в теплоиспользующей эжекторной холодильной машине (ТЭХМ) на низкокипящем рабочем теле (НРТ), например хладоне, утилизирую-

щей теплоту уходящих газов приводного дизеля (рис. 3), в которой пароструйный хладоновый эжектор выполняет функцию хладонового компрессора [2].

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.

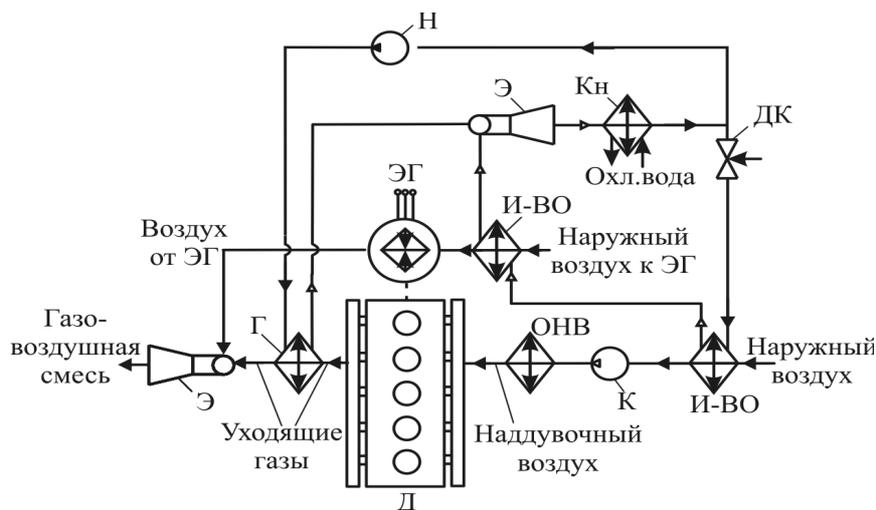


Рис. 3. Схема эжекционной системы охлаждения вентиляционного воздуха ЭГ и воздуха на входе приводного дизеля с помощью ТЭХМ:

К – наддувочный компрессор; ОНВ – охладитель наддувочного воздуха водяной;  
Г – генератор ТЭХМ; Э – эжектор; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель;  
Кн – конденсатор; Н – насос хладона; ДК – дроссельный клапан

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).

С целью упрощения на рис. 3 опущен контур пароводяного утилизационного котла, к паровой магистрали которого подключают генератор паробразного хладона, а генератор условно показан на линии выпускных газов.

Использование теплоты уходящих газов в ТЭХМ для выработки холода и охлаждения в И-ВО

наружного воздуха (воздуха из МО), подаваемого на вентиляцию ЭГ и в наддувочный компрессор приводного дизеля, приводит к снижению температуры газов на входе, в газозвушной эжектор и некоторому ухудшению его напорно-циркуляционной характеристики  $U = f(\Delta P_c)$ .

На рис. 4 представлены зависимости коэффициента эжекции  $U$  от создаваемого эжектором напора  $\Delta P_c$  при разной рабочей разности давлений газов  $\Delta P_p$  в сопле и температуре уходящих газов дизеля после отвода от них теплоты в генераторе ТЭХМ  $t_{гр} = 150$  °С.

Как видно, при температуре уходящих газов на входе в рабочее сопло эжектора после отвода от них теплоты в генераторе ТЭХМ  $t_{гр} = 150\text{ }^\circ\text{C}$  кривые напорно-циркуляционной характеристики эжектора  $U = f(\Delta P_c)$  снижаются более резко (по сравнению с  $t_{гр} = 350\text{ }^\circ\text{C}$  на рис. 2).

В результате при рабочей разности давлений газов  $\Delta P_p$ , срабатываемой в сопле,

$$\Delta P_p = 3000 \dots 4000 \text{ Па},$$

и напоре (избыточном давлении газозвдушной смеси)

$$\Delta P_c = 1000 \dots 2000 \text{ Па}$$

коэффициенты эжекции ниже:  $U = 0,6 \dots 1,0$ .

Однако следует учитывать, что при этом на вход в ЭГ подается не наружный воздух с температурой  $30 \dots 35\text{ }^\circ\text{C}$  или воздух из МО с температурой  $40 \dots 45\text{ }^\circ\text{C}$  (тропические условия плавания), как в системе вентиляции на рис. 1, а воздух, охлажденный в ТЭХМ примерно на  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , которого требуется почти в 2 раза меньше, а значит и меньше требуемые коэффициенты эжекции  $U$ .

В случае применения в качестве приводного двигателя ЭГ высокооборотного дизеля (ВОД), температура уходящих газов которого после ТК  $t_{гр} = 450\text{ }^\circ\text{C}$  и более, напорно-циркуляционные характеристики эжектора будут еще выше (рис. 5).

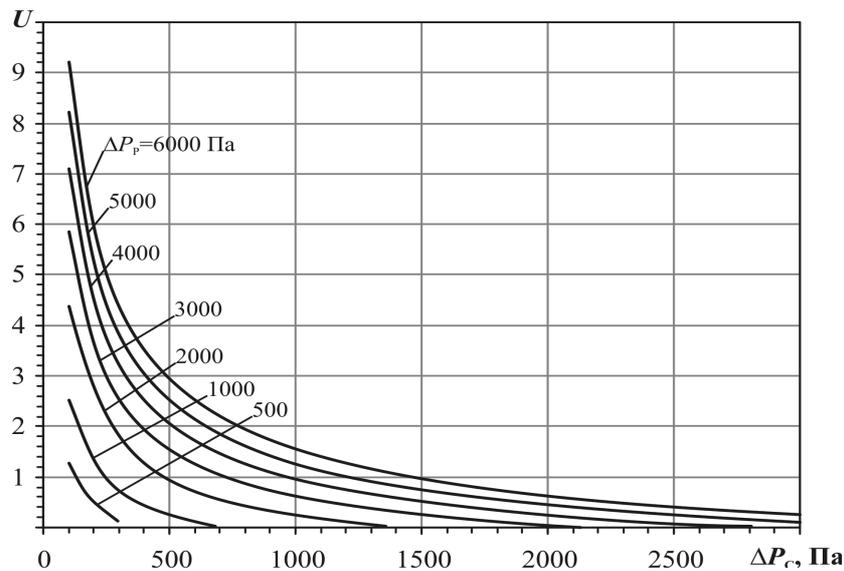


Рис. 4. Коэффициенты эжекции  $U$  в зависимости от создаваемого эжектором напора  $\Delta P_c$  газозвдушной смеси при разной рабочей разности давлений  $\Delta P_p$  в сопле и температуре уходящих газов дизеля  $t_{гр} = 150\text{ }^\circ\text{C}$

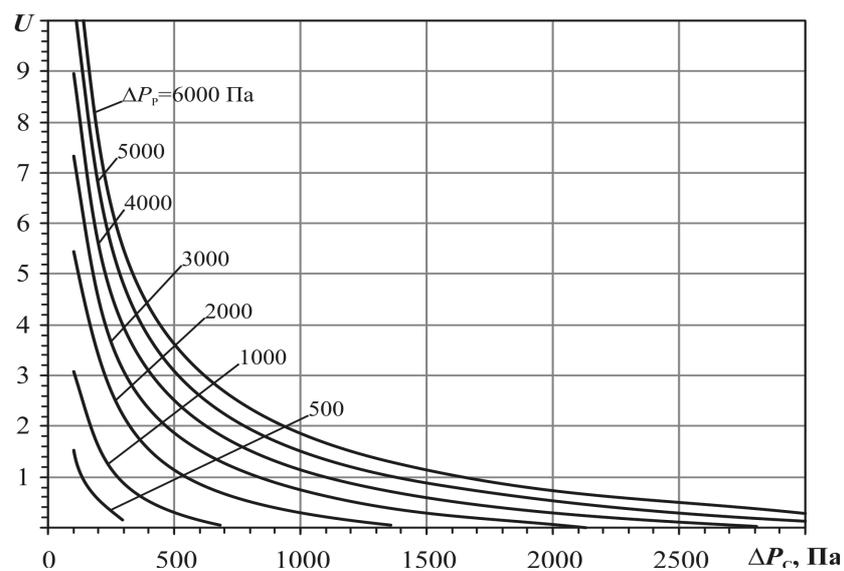


Рис. 5. Коэффициенты эжекции  $U$  в зависимости от создаваемого эжектором напора  $\Delta P_c$  газозвдушной смеси при разной рабочей разности давлений  $\Delta P_p$  в сопле и температуре уходящих газов дизеля  $t_{гр} = 450\text{ }^\circ\text{C}$

Расширяются также возможности для совместного применения эжекционной системы вентиляции ЭГ и охлаждения вентиляционного воздуха в ТЭХМ. Так, наряду с использованием в ТЭХМ теплоты уходящих газов перед газозвоздушным эжектором (рис. 3) становится возможным использование теплоты газозвоздушной смеси после эжектора (рис. 6).

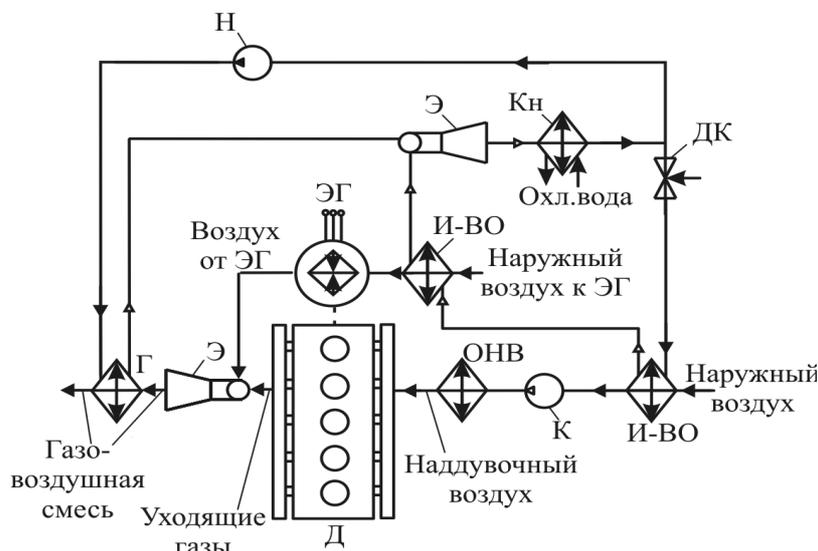


Рис. 6. Схема эжекционной системы охлаждения вентиляционного воздуха ЭГ и воздуха на входе приводного дизеля с помощью ТЭХМ:

К – наддувочный компрессор; ОНВ – охладитель наддувочного воздуха водяной;  
Г – генератор ТЭХМ; Э – эжектор; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель;  
Кн – конденсатор; Н – насос хладагона; ДК – дроссельный клапан

Высокие коэффициенты эжекции

$$U = 0,8 \dots 1,2 \text{ при } \Delta P_c = 1000 \text{ Па}$$

и

$$U = 2,0 \dots 2,5 \text{ при } \Delta P_c = 500 \text{ Па (рис. 5)}$$

позволяют эжектировать не только вентиляционный воздух ЭГ, но и воздух МО в зоне расположения ДГ, т.е. осуществлять зональную вентиляцию МО.

### Выводы

Применение эжекционных систем вентиляции ЭГ и кондиционирования вентиляционного воздуха, использующих для циркуляции воздуха через ЭГ энергию уходящих газов приводного дизеля, позволяет исключить соответствующие энергетические затраты на циркуляцию воздуха и за счет этого увеличить на 2...3 % электрическую мощность ДГ по сравнению с традиционной вентиляцией ЭГ.

Предложены варианты совместного применения эжекционной системы вентиляции ЭГ и системы охлаждения вентиляционного воздуха ЭГ в ТЭХМ.

Хотя температура газозвоздушной смеси на входе в генератор ТЭХМ в схеме на рис. 6 и ниже, чем уходящих газов в схеме на рис. 3, но расход смеси больше:  $G_c = (1 + U) G_{уг}$ .

Поэтому при выборе схемного решения эжекционной системы кондиционирования следует учитывать температуру и расход источников теплоты для ТЭХМ.

### 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 тепло-использующими 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. Сюбаев М.А. *Анализ аварий и неисправностей в судовых электроустановках* / М.А. Сюбаев, А.Б. Хайкин, Е.А. Шейнцев. – Л.: Судостроение, 1975. – 176 с.
5. *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 (проект № GP/F32/152 по Гранту Президента Украины).

Поступила в редакцию 1.06.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Е. Лагутин, Одесская государственная академия холода, Одесса, Украина.

### ЕЖЕКЦІЙНІ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ СУДНОВОГО ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЙНОГО ПОВІТРЯ

*А.М. Радченко, О. Стахель*

Запропоновані ефективні системи ежекційних вентиляції суднового електрогенератора та кондиціювання вентиляційного повітря. Ежекційні системи можуть застосовуватись для вентиляції електрогенератора зовнішнім повітрям як найпростішого варіанта кондиціювання повітря, а також для кондиціювання вентиляційного повітря суднового електрогенератора з його охолодженням тепловикористовуючою холодильною машиною. Циркуляція повітря в ежекційних системах здійснюється за рахунок енергії випускних газів приводного дизеля. При цьому вилучаються енергетичні витрати на циркуляцію вентиляційного повітря. Наведені напірно-циркуляційні характеристики ежекційних пристроїв і схемні рішення ежекційних систем.

**Ключові слова:** кондиціювання, вентиляція, ежекція, електрогенератор, дизель, утилізація, випускні гази, напір.

### EJECTIVE SYSTEMS OF VENTILATION OF SHIP ALTERNATOR AND CONDITIONING OF VENTILATING AIR

*A.N. Radchenko, A. Stachel*

The efficient systems for ejective ventilation of ship alternator and conditioning of ventilating air have been proposed. Ejective systems can be applied for ventilation of ship alternator by ambient air as the simplest variant of air conditioning and for conditioning of ventilating air of ship alternator with its cooling by waste heat recovery cooling machine. The circulation of air in ejective systems can be performed by using the energy of exhaust gases of drive diesel. With this the energy lost for circulation of ventilation air are excluded. The pressure-circulation characteristics of ejective devices and schemes of ejective systems are presented.

**Key words:** conditioning, ventilation, ejection, alternator, diesel, utilization, exhaust gases, pressure increase.

**Радченко Андрей Николаевич** – канд. техн. наук, с.н.с., доцент кафедры, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Стахель Александр** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры, Западно-Померанский университет технологии, Польша, e-mail: andrad69@mail.ru.