

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ ХЛАДОНОВЫМИ ЭЖЕКТОРНЫМИ ХОЛОДИЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

*Проаналізовано ефективність охолодження електрогенераторів ежекторними холодильними машинами, що використовують теплоту вентиляційного повітря після електрогенераторів і наддувного повітря дизельгенераторів для зниження температури вентиляційного повітря на вході електрогенераторів.*

*Effectiveness of cooling of alternators by ejector refrigeration systems utilizing heat of ventilating air after alternators and scavenge air of diesel generators to lower temperature of ventilating air at the inlet of alternators has been analyzed.*

## 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

В электрогенераторах часть подводимой электрической энергии теряется в виде теплоты. Значительный нагрев обмоток и опасность термического разрушения их изоляции снижают КПД и ограничивают мощность электрогенераторов. С целью обеспечения стабильной и безопасной работы электрогенераторов необходимо обеспечить отвод выделяемой теплоты, для чего предусматривают их охлаждение. Наибольшее распространение получили системы охлаждения с принудительной циркуляцией наружного воздуха, однако с повышением его температуры охлаждающая способность таких систем снижается. Повысить эффективность систем вентиляции можно с помощью теплоиспользующих холодильных машин (ТХМ), которые использовали бы теплоту, выделяемую электрогенераторами и отводимую от них охлаждающим воздухом, для производства холода, который в свою очередь – для снижения температуры воздуха, подаваемого на охлаждение. В качестве рабочего тела в ТХМ используют низкокипящие вещества – хладоны, что позволяет, с одной стороны, утилизировать теплоту сравнительно низкого температурного уровня, а с другой – снижать температуру воздуха, подаваемого на

вентиляцию электрогенераторов, до температуры, которую невозможно достигнуть в случае применения в качестве хладоносителя воды. Отвод теплоты от воздуха осуществляется в процессе кипения хладона.

Наибольшее распространение получили ТХМ абсорбционного типа. Известны результаты исследований применения абсорбционных ТХМ, использующих теплоту уходящих газов газотурбинных двигателей (ГТД) для охлаждения воздуха систем комфортного кондиционирования, а также предложения по использованию в них теплоты наддувочного воздуха ДВС [1-5]. Однако абсорбционным холодильным машинам свойственны повышенные габариты (соответственно и аэродинамическое сопротивление), из-за чего целесообразность их применения для охлаждения компактных электрогенераторов весьма проблематична. Конструктивной простотой и надежностью в эксплуатации характеризуются ТХМ струйного – эжекторного типа, в которых эжектор выполняет функцию компрессора [6-8]. Использование эжекторных холодильных машин (ЭХМ) не приведет к заметному усложнению системы охлаждения электрогенераторов. Однако ЭХМ отличаются невысокими значениями тепловых коэффициентов  $\zeta$ , представляющих собой отношение количества

холода к количеству затраченной на его производство теплоты и зависящих в свою очередь от температуры источника сбросной теплоты – нагретого в электрогенераторе воздуха. При относительно невысоких температурах воздуха после электрогенераторов произведенного в ЭХМ холода может оказаться недостаточно для снижения температуры наружного воздуха, подаваемого на их вентиляцию. Поэтому необходимо будет задействовать и другие источники сбросной теплоты электрогенераторов с более высокой температурой.

Целью исследования является оценка эффективности охлаждения электрогенераторов эжекторными холодильными машинами и определение условий, при которых их применение целесообразно.

## 2. Анализ результатов исследования

Теплоиспользующая система охлаждения электрогенератора на базе эжекторной холодильной машины схематично представлена на рис. 1. Теплоту воздуха, нагретого в процессе охлаждения электрогенератора, используют для выработки холода, который в свою очередь – для снижения температуры наружного воздуха, подаваемого на вход электрогенератора. Эжекторная холодильная машина состоит из силового

и холодильного контуров. Силовой контур служит для получения паров хладагona высокого давления, энергию которых используют в эжекторе для поджатия паров хладагona низкого давления, всасываемых из испарителя хладагona-воздухоохладителя (И-ВО) холодильного контура, до давления в конденсаторе. Жидкий хладагон после конденсатора разделяют на два потока: первый – подают насосом в генератор, где жидкий хладагон нагревают и испаряют при высоком давлении за счет теплоты, отводимой от нагретого воздуха, отводимого от электрогенератора, а второй – расширяют (дросселируют) в дроссельном клапане и направляют в испаритель-воздухоохладитель, в котором жидкий хладагон испаряют при низком давлении и соответственно температуре, отводя теплоту от наружного воздуха на входе электрогенератора. Хладагоновые пары всасывают из испарителя-воздухоохладителя эжектором и подают снова в конденсатор. Таким образом, эжектор совмещает функции детандера силового контура (расширение хладагоновых паров происходит в его сопле) и компрессора холодильного контура (повышение давления хладагоновых паров, всасываемых из испарителя-воздухоохладителя, происходит в камере смешения и диффузоре).

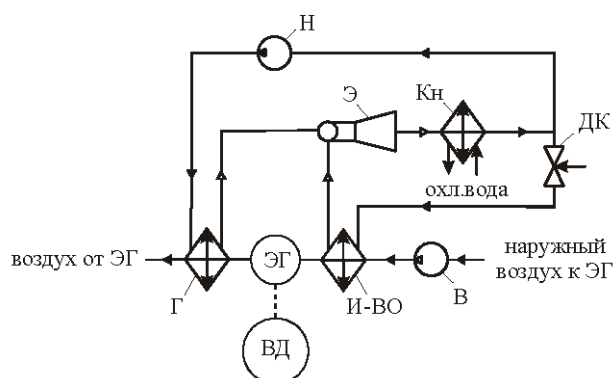


Рис. 1. Схема системы охлаждения электрогенератора на базе эжекторной холодильной машины:

ЭГ – электрогенератор; ВД – вспомогательный дизель; Г – генератор хладагоновых паров;

И-ВО – испаритель-воздухоохладитель; Э – эжектор; Кн – конденсатор; Н – хладагоновый насос;

ДК – дроссельный клапан; В – вентилятор

Следует отметить, что в генераторе ЭХМ происходит сначала нагрев жидкого хладагona, поступающего из конденсатора, от температуры конденсации  $t_k$  до температуры  $t_r$  кипения хладагona при высоком давлении, а затем испарение жидкого хладагona при температуре  $t_r$  и в некоторых случаях перегрев образовавшегося пара. Соответственно теплообменная поверхность генератора разделяется на экономайзерную (нагревательную) и испарительную секции, а в случае перегрева пара – еще и пароперегревательную.

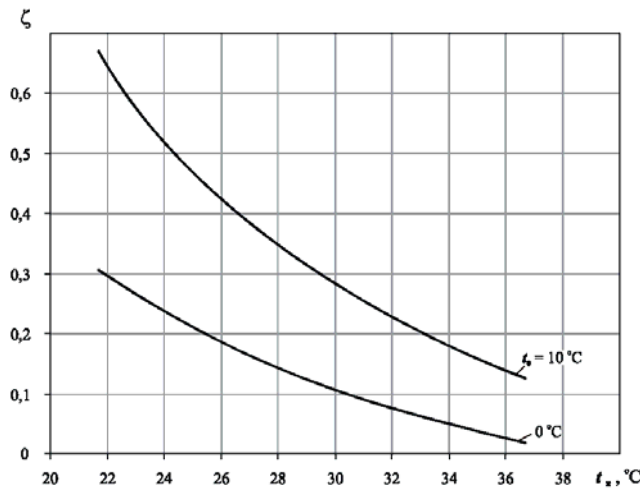
Как отмечалось, эффективность ЭХМ

характеризуется тепловым коэффициентом  $\zeta = Q_0 / Q_r$ , представляющим собой отношение холодопроизводительности  $Q_0$  (количества теплоты, отводимой в испарителе-воздухоохладителе ЭХМ от наружного воздуха, подаваемого на охлаждение электрогенератора, к хладагону, кипящему при низких давлении и соответственно температуре) к количеству теплоты  $Q_r$ , отводимой в генераторе ЭХМ от воздуха, нагретого в электрогенераторе, к хладагону, кипящему при высоких давлении и температуре.

На рис. 2 представлены зависимости теплового коэффициента  $\zeta$  эжекторной ТХМ от

температуры конденсации хладона  $t_k$  при его температурах кипения в испарителе-воздухоохладителе  $t_0 = 0$  и  $10$  °С и в генераторе  $t_r = 70$  °С. В качестве хладона использован озонобезо-

пасный хладон R142В.



**Рис. 2.** Тепловые коэффициенты ЭХМ  $\zeta$  в зависимости от температуры конденсации  $t_k$  хладона R142В при температуре кипения в генераторе  $t_r = 70$  °С и в И-ВО  $t_0 = 0$  и  $10$  °С

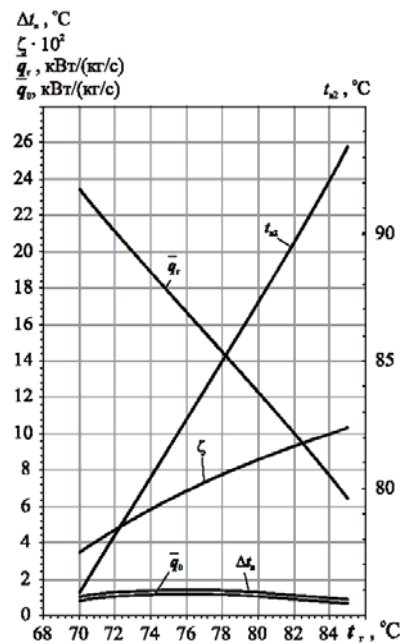
Как видно, тепловой коэффициент  $\zeta$  с повышением  $t_k$  существенно снижается, причем при большей температуре кипения  $t_0$  это снижение происходит более резко. Это говорит о том, что, во-первых, в случае водяного охлаждения конденсатора (при низких  $t_k$ ) тепловая эффективность ЭХМ гораздо выше, чем при его воздушном охлаждении (при высоких  $t_k$ ), и, во-вторых, при более низкой температуре кипения в испарителе-воздухоохладителе  $t_0$  влияние температуры конденсации  $t_k$  на  $\zeta$  сказывается слабее. С повышением температуры кипения в испарителе-воздухоохладителе  $t_0$  коэффициент  $\zeta$  увеличивается, причем это увеличение особенно значительное при низких  $t_k$ , что свидетельствует об эффективности применения ЭХМ в случае водяного охлаждения конденсатора и при повышенной температуре наружного воздуха, подаваемого на вентиляцию электрогенератора.

Результаты анализа эффективности применения ЭХМ для охлаждения воздуха на входе электрогенератора приведены на рис. 3 в виде зависимости тепловых коэффициентов ЭХМ  $\zeta$ , удельных (отнесенных к единичному расходу воздуха) тепловых нагрузок на генератор ЭХМ  $\bar{q}_r$  (удельного количества теплоты, отведенной от нагретого в электрогенераторе воздуха) и испаритель-воздухоохладитель  $\bar{q}_0$  (удельного количества теплоты, отведенной от воздуха на входе в электрогенератор, т.е. удельной холодопроизводительности ЭХМ), и снижения температуры  $\Delta t_b$  воздуха на входе в электрогенератор от температуры кипения НРТ в генераторе  $t_r$  при температуре кипения НРТ в испарителе  $t_0 = 0$  °С; конденсации  $t_k = 35$  °С; нагретого воздуха перед генератором ЭХМ (после электрогенератора)  $t_{b1} = 100$  °С. Здесь же

нанесены значения температуры  $t_{b2}$  воздуха после генератора ЭХМ, т.е. воздуха, выбрасываемого в атмосферу. При этом температура воздуха после испарительной секции генератора ЭХМ, расположенной первой по ходу нагретого в электрогенераторе воздуха, принималась на  $10$  °С выше, чем температура кипения хладона в генераторе  $t_r$ .

Как видно, с повышением  $t_r$  от  $70$  до  $85$  °С удельная тепловая нагрузка на генератор  $\bar{q}_r$  снижается, а тепловой коэффициент  $\zeta$  увеличивается, что приводит сначала к некоторому возрастанию удельной холодопроизводительности ЭХМ  $\bar{q}_0$ , а потом ее снижению. В первом случае превалирует влияние на  $\bar{q}_0$  возрастания  $\zeta$ , а во втором – снижения  $\bar{q}_r$ . Поскольку уменьшение температуры наружного воздуха на входе в электрогенератор  $\Delta t_b$  пропорционально удельной холодопроизводительности ЭХМ  $\bar{q}_0$ , то характеры изменения  $\bar{q}_0$  и разности температур воздуха  $\Delta t_b$  идентичны. Как видно, снижение температуры воздуха на входе электрогенератора незначительное:  $\Delta t_b \approx 2$  °С, что свидетельствует о низкой эффективности охлаждения воздуха в ЭХМ. Причина – недостаточно высокая температура нагретого воздуха после электрогенератора ( $t_{b1} = 100$  °С), используемого в качестве источника тепловой энергии для ЭХМ.

Увеличить удельную холодопроизводительность ЭХМ  $\bar{q}_0$  и, соответственно, глубину охлаждения воздуха на входе в электрогенератор  $\Delta t_b$  можно, повышая тепловой потенциал источника теплоты, т.е. температуру  $t_{b1}$ . С этой целью при недостаточно высокой температуре воздуха  $t_{b1}$  после электрогенератора (на входе в генератор ЭХМ) дополнительно можно использовать другие вторичные энергоресурсы,



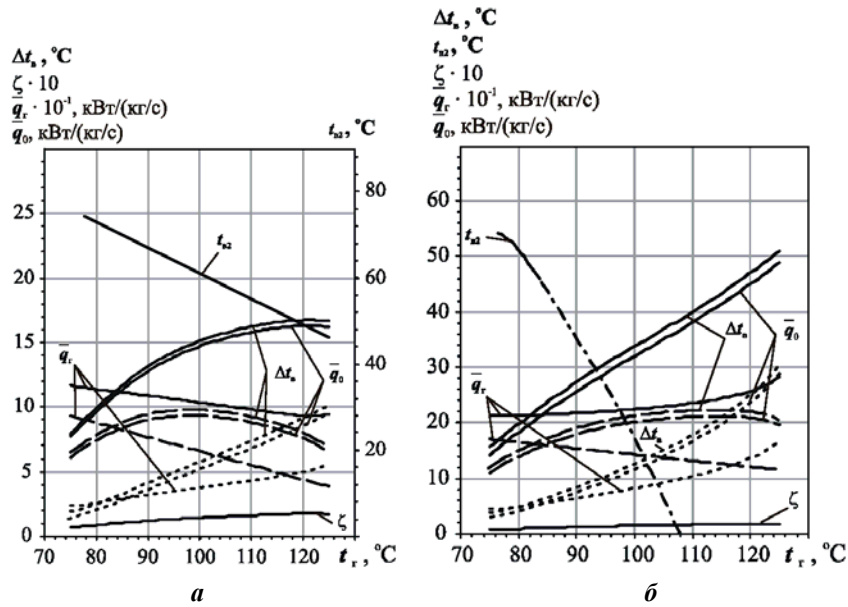
**Рис. 3.** Зависимости тепловых коэффициентов ЭХМ  $\zeta$ , удельных тепловой нагрузки на генератор ЭХМ  $\bar{q}_r$  и холодопроизводительности ЭХМ  $\bar{q}_0$ , снижения температуры  $\Delta t_b$  наружного воздуха в ЭХМ, а также температура  $t_{b2}$  воздуха после генератора ЭХМ при температуре нагретого в электрогенераторе воздуха перед генератором ЭХМ  $t_{b1} = 100^\circ\text{C}$  от температуры кипения хладона в генераторе  $t_r$  при температуре кипения хладона в испарителе-воздухоохладителе  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ; конденсации  $t_k = 35^\circ\text{C}$

например выпускные газы после дизельгенератора с температурой свыше  $350^\circ\text{C}$ , а также наддувочного дизельгенератора.

Рассмотрим как один из вариантов в качестве дополнительного источника теплоты наддувочный воздух дизельгенератора. При этом генератор ЭХМ выполняют в виде двух секций – испарительной, в которой происходит испарение жидкого хладона при высоких давлении и соответственно температуре, и экономайзерной, в которой имеет место нагрев жидкого хладона от температуры конденсации до температуры кипения в испарительной секции. Испарительную секцию генератора устанавливают на линии наддувочного воздуха дизельгенератора, а экономайзерную – после электрогенератора, отводя в ней теплоту от воздуха, нагретого в электрогенераторе. В зависимости от степени наддува турбокомпрессора температура наддувочного воздуха может составлять  $t_{b1} = 180\dots 250^\circ\text{C}$  и выше.

На рис. 4 приведены удельные тепловая нагрузка на генератор  $\bar{q}_r$  и холодопроизводительность  $\bar{q}_0$ , тепловые коэффициенты ЭХМ  $\zeta$ , снижение температуры  $\Delta t_b$  охлаждающего электрогенератор воздуха в испарителе-воздухоохладителе, температура  $t_{b2}$  воздуха на выходе экономайзерной секции генератора ЭХМ, установленной за электрогенератором, в зависимости от температуры кипения хладона в генераторе  $t_r$  при температуре кипения хладона в

испарителе-воздухоохладителе  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ; конденсации  $t_k = 35^\circ\text{C}$  и сжатого воздуха (наддувочного воздуха дизельгенератора) на входе испарительной секции генератора  $t_{cb1} = 180^\circ\text{C}$  (рис. 4, а) и  $250^\circ\text{C}$  (рис. 4, б). Температура сжатого воздуха после отвода от него теплоты на испарение хладона в испарительной секции генератора (при температуре кипения  $t_r$ ) принималась  $t_{cb,п2} = t_r + 20^\circ\text{C}$ . При температуре воздуха после электрогенератора, недостаточно высокой для нагрева жидкого хладона (до температуры насыщения  $t_r$ ) в экономайзерной секции генератора ЭХМ ( $t_{b1} < t_r$ ), окончательный нагрев хладона до температуры  $t_r$  производят в испарительной секции генератора, поскольку температура сжатого воздуха после отвода от него теплоты на испарение хладона  $t_{cb,п2}$  всегда выше  $t_r$ . Параметры, приведенные на рис. 4 (как и на рис. 3) получены из условия, что расходы наружного воздуха на входе электрогенератора и наддувочного воздуха дизельгенератора одинаковы. В случае их отличия указанные на рис. 4 величины изменятся согласно соотношению расходов. Так, если расход наддувочного воздуха дизельгенератора больше расхода наружного воздуха, охлаждающего электрогенератор, то перепад температур  $\Delta t_b$  возрастет в соответствии с их отношением, скорректированным с учетом его отличия от соотношения удельных тепловых нагрузок на испарительную и экономайзерную секции генератора ЭХМ.



**Рис. 4.** Зависимости тепловых коэффициентов ЭХМ  $\zeta$ , удельных тепловой нагрузки на генератор ЭХМ  $\bar{q}_r$  и холодопроизводительности ЭХМ  $\bar{q}_0$ , снижения температуры  $\Delta t_b$  наружного воздуха на входе в электрогенератор (в испарителе-воздухоохладителе ЭХМ) и температуры  $t_{b2}$  воздуха после генератора ЭХМ при температуре нагретого в электрогенераторе воздуха (перед генератором ЭХМ)  $t_{b1} = 100$  °С от температуры кипения хладагента в генераторе  $t_r$  при температуре кипения хладагента в испарителе-воздухоохладителе  $t_0 = 0$  °С; конденсации  $t_k = 35$  °С и надувочного воздуха дизельгенератора – на входе испарительной секции генератора ЭХМ  $t_{cb1}$ : *a* –  $t_{cb1} = 180$  °С; *б* –  $t_{cb1} = 250$  °С; — за счет отвода теплоты генератором в целом  $\bar{q}_0, \bar{q}_r$ ; - - - испарительной секцией  $\bar{q}_0', \bar{q}_r'$ ; ..... – экономайзерной секцией  $\bar{q}_0', \bar{q}_r'$

Как видно, при  $t_{cb1} = 180$  °С (рис. 4, *a*) температура наружного воздуха, подаваемого на охлаждение электрогенератора, уменьшается в ЭХМ примерно на величину  $\Delta t_b = 15$  °С, а температура отводимого от электрогенератора нагретого воздуха снижается от ее значения  $t_{b1} = 100$  °С после электрогенератора до ее величины  $t_{b2} < 60$  °С после экономайзерной секции генератора ЭХМ. В случае же  $t_{cb1} = 250$  °С (рис. 4, *б*) температура воздуха на входе электрогенератора уменьшается на величину  $\Delta t_b = 25...45$  °С (в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе  $t_r$ ). Однако при нахождении максимального снижения  $\Delta t_b$  следует учитывать, что температура  $t_{b2}$  нагретого в электрогенераторе воздуха не может снижаться в экономайзерной секции генератора ЭХМ ниже значения, превышающего температуру  $t_k$  конденсации (жидкого хладагента, поступающего в экономайзер из конденсатора) на величину минимального температурного напора в экономайзере – разности температур  $t_{b2} - t_k = 10...15$  °С, устанавливаемой исходя из интенсивности теплопередачи.

Как видно, применение для охлаждения электрогенератора эжекторной холодильной

машины, использующей кроме нагретого в электрогенераторе воздуха еще и другие источники сбросной теплоты самого дизельгенератора (например наддувочного воздуха), обеспечивает понижение температуры вентиляционного воздуха на входе электрогенератора на величину  $\Delta t_b = 15...40$  °С (в зависимости от температуры дополнительного источника сбросной теплоты).

### 3. Выводы

1. Установлено, что применение для охлаждения электрогенераторов теплоиспользующих ЭХМ целесообразно в случае, когда в ЭХМ помимо нагретого в электрогенераторах воздуха используют дополнительные источники теплоты более высокого уровня, например наддувочного воздуха дизельгенераторов и других.
2. Показано, что теплоиспользующая система охлаждения электрогенератора на базе ЭХМ обеспечивает понижение температуры вентиляционного воздуха на входе электрогенератора на  $15...40$  °С.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмина Т.Г., Тесля Е.С. О повышении мощности и кпд ГТД в теплое время года // Газотурбинные технологии. – № 1. – 2008. – С. 16-18.
2. 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.

3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Захаров Ю.В. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины. – СПб.: Судостроение, 1994. – 504 с.
7. Петренко В.А. Принцип выбора рабочего вещества для эжекторной холодильной машины // Холодильная техника и технология. – 2001. – № 1 (70). – С. 16-21.
8. Петренко В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование эжекторной холодильной машины в режиме кондиционирования воздуха // Холодильная техника и технология. – 2001. – № 2 (71). – С. 12-18.

*Надійшла до редколегії 24.03.07.*