

УДК 621.57

С.С. РЫЖКОВ¹, А.Н. РАДЧЕНКО¹, С.Г. ФОРДУЙ²¹ *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*² *PepsiCo Europe, Украина*

НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРИГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

Проанализирована эффективность тригенерационной установки на базе когенерационных газопоршневых модулей JMS GE Jenbacher для автономного энергообеспечения завода ООО "Сандора" – "Pepsico Ukraine" (Николаевская обл.). Выявлены резервы повышения эффективности как всей тригенерационной установки, так и собственно когенерационных модулей, обоснованы направления их реализации, обеспечивающие эффективную трансформацию тепла газовых двигателей в холод, используемый как на технологические нужды, так для самих газопоршневых двигателей (внутрицикловая тригенерация).

Ключевые слова: *внутрицикловая тригенерация, автономное энергообеспечение, утилизация тепла, охлаждение, газопоршневой двигатель, абсорбционная холодильная машина.*

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Установки автономного электро-, тепло- и холодообеспечения (тригенерационные), или интегрированные энергетические системы (Integrated Energy Systems – IES) [1–3], находят все большее распространение. В таких энергоустановках тепло двигателей трансформируется теплоиспользующими холодильными машинами (ТХМ), в холод, который используется на технологические нужды или же кондиционирование воздуха разных объектов.

Холодильная мощность (холодо-производительность) тригенерационных установок определяется объемами сбросного тепла и эффективностью его трансформации в холод. Для привода электрогенераторов особенно перспективно применение газопоршневых двигателей (ГПД), выпускаемых в когенерационном исполнении – в виде когенерационных модулей, включающих штатные теплообменники, в которых теплота, отводимая от выпускных газов, газозвдушной смеси (ГВС), смазочного масла и корпуса двигателя (охлаждающей рубашку двигателя воды), используется для нагрева воды (теплоносителя). Для преобразования таких модулей в тригенерационные установки достаточно к системе теплоносителя подключить ТХМ, например абсорбционную бромистолитиевую (АБХМ).

Сохранение термического состояния цилиндропоршневой группы ГПД на безопасном уровне обеспечивается поддержанием температуры обратного теплоносителя, поступающего в теплообменники отвода тепла от корпуса двигателя, не выше 70 °С, а наддувочной ГВС в низкотемпературной

ступени охладителя наддувочной смеси ОНС_{нт} не выше 40...45 °С. В то же время температура обратного теплоносителя, поступающего от АБХМ, составляет 75 °С и даже выше. Избыток тепла сбрасывается в атмосферу градирню аварийного сброса.

Теплота наддувочной ГВС также отводится системой обратного охлаждения в атмосферу градирней сухого типа. При повышенных температурах наружного воздуха на входе в градирню, соответственно и охлажденной в градирне воды на входе низкотемпературной ступени охладителя наддувочной смеси, система обратного охлаждения не в состоянии обеспечить температуру ГВС ниже 40...45 °С. Во избежание опасных термических напряжений деталей цилиндрической группы система автоматического регулирования (САР) уменьшает подачу газа, переводя ГПД на частичные режимы работы с соответствующим сокращением производства электроэнергии и ухудшением топливной эффективности.

Для поддержания температуры наддувочной ГВС на безопасном уровне 40...45 °С целесообразно использовать полученный в АБХМ холод [4] или же снижать температуру воды в градирне системы обратного охлаждения до более низкой температуры, в частности, увлажнением наружного воздуха на ее входе до состояния насыщения с понижением температуры воздуха до ее значения по мокрому термометру t_m , т.е. переводом градирни на испарительное охлаждение.

Поскольку с повышением температуры воздуха на входе термодинамическая эффективность ГПД снижается (уменьшается КПД, возрастает удельный расход топлива), то его охлаждение позволяет под-

держивать высокую топливную экономичность ГПД, и прежде всего при неблагоприятных климатических условиях эксплуатации – повышенных температурах наружного воздуха. Для этого также целесообразно использовать холод, полученный в АБХМ [5]. Однако тепловые потери при трансформации тепла, связанные с указанным выше сбросом его части в атмосферу, обуславливают дефицит холода, особенно при повышенных его расходах на технологический нужды.

Цель исследования – выявление резервов и определение путей повышения эффективности трансформации теплоты в тригенерационной установке автономного энергообеспечения.

2. Результаты исследования

При определении направлений повышения эффективности трансформации теплоты в тригенерационной установке использованы данные эксплуатации первой на Украине установки автономного электро-, тепло- и холодообеспечения завода ООО "Сандора"–"Pepsico Ukraine" (Николаевская обл.), введенной в эксплуатацию в 2011 г. Проектирование и монтаж установки выполнены ЧНПП "СИНАПС"–"GE Energy" (г. Киев) и ООО "Хладотехника" (г. Николаев). Тригенерационная установка включает два когенерационных ГПД JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher (электрическая мощность одного ГПД 1400 кВт, тепловая мощность 1500 кВт), АБХМ AR-D500L2 Century (холодопроиз-

водительностью 2000 кВт) и два центральных кондиционера SIC Jan HREBEC (Чехия) 1LG4223-8AB60 (холодопроизводительностью по 350 кВт и объемным расходом воздуха по 60000 м³/ч каждый). Отвод теплоты от воды, охлаждающей ГВС ГПД и АБХМ, осуществляется системами оборотного охлаждения с градирнями типа Evapco.

Теплота, отведенная от выпускных газов ГПД в утилизационном котле (УК), ГВС в высокотемпературной ступени охладителя наддувочной смеси (ОНС_{ВТ}), от охлаждающей воды рубашки двигателя и смазочного масла в пластинчатых теплообменниках (рис. 1), используется в АБХМ для производства холода в виде охлажденной воды с температурой 7...10 °С.

Охлажденная вода является хладоносителем для теплообменных аппаратов технологического охлаждения (процессы пастеризации соков и т.п.), а также двух центральных кондиционеров, из которых охлажденный и осушенный воздух подается в машинное отделение (МО) когенерационных ГПД, а оттуда – на всасывание наддувочных турбокомпрессоров (ТК) ГПД.

В тригенерационных установках на базе ГПД особенно остро стоит задача охлаждения наддувочной ГВС, поскольку при повышенных температурах наружного воздуха, например 25...35 °С с учетом разности температур между водой замкнутой системы оборотного охлаждения и атмосферным воздухом (около 10 °С) в градирнях сухого типа, а также ГВС и охлаждающей водой в ОНС_{ВТ}



а



б

Рис. 1. Когенерационный модуль ГПД JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher: утилизационный водогрейный котел (экономайзер) на выпускных газах (нижний горизонтальный теплообменник слева), высоко- и низкотемпературные ступени охладителя наддувочной ГВС (а), когенерационные пластинчатые теплообменники отвода тепла от корпуса двигателя (левый) и масла (правый) (б)

охлаждение ГВС возможно до температуры 45...55 °С, что выше граничной температуры ГВС, которая поддерживается во впускном ресивере на уровне примерно 40 °С системой автоматического регулирования (САР) подачи газа в ГПД с переводом ГПД на долевые режимы работы.

В качестве возможных путей решения этой задачи – снижение температуры охлаждающей воды, подаваемой в ОНС_{нт}, ее дополнительным охлаждением, например, в пластинчатом теплообменнике, хладоносителем (холодной водой с температурой 7...10 °С) от АБХМ [5], либо путем подачи на вход градирни системы оборотного охлаждения наружного воздуха, предварительно увлажненного до состояния насыщения с соответствующим понижением его температуры до ее значения по мокрому термометру t_m , т.е. переводом градирни на испарительное охлаждение.

Как показали расчеты, за счет снижения температуры воздуха на входе градирни при его увлажнении примерно на 10 °С температура увлажненного воздуха не превышает 23...25 °С в наиболее теплое время полудня. В результате температура охлажденной в ОНС_{нт} наддувочной ГВС также значительно ниже (по сравнению с градирней сухого типа) и не превышает 40...45 °С, оставаясь близкой температуре 40 °С, на которую настроена САР подачи газа в ГПД. Таким образом, создаются условия для сведения к минимуму эксплуатации ГПД на частичных режимах, вызывающих сокращение производства электроэнергии и ухудшение топливной эффективности.

Второй проблемой, которую приходится решать в тригенерационных установках на базе ГПД, это повышение эффективности трансформации тепла в холод при условии поддержания термического состояния когенерационного модуля ГПД на безопасном уровне, и прежде всего температуры обратного, охлажденного, теплоносителя на входе в теплообменники отвода тепла от корпуса двигателя не выше $t_{г.вх} = 70$ °С.

В АБХМ снижение температуры теплоносителя составляет не более $\Delta t_{г.АХМ} = 10...15$ °С, что при его исходной температуре на входе АБХМ 90 °С (на выходе из когенерационного модуля ГПД) исключает возможность снижения его до температуры $t_{г.вх} = 70$ °С (на входе в ГПД) и вызывает необходимость сбрасывать избыточную теплоту в атмосферу градирней аварийного сброса. Как видно из рис. 2, на котором приведены результаты обработки данных по температурам теплоносителя, полученных в ходе автоматизированного мониторинга параметров тригенерационной установки ООО "Сандора" за 28.07.2011, потери тепла обратного теплоносителя Q_n из-за его сбрасывания в атмосферу составляют около 40 % тепла $Q_{га}$, полезно использованного в АБХМ, и практически треть тепловой мощности когенерационного модуля, равной их сумме: $Q_{га} + Q_n = 1400$ кВт.

Значения общего количества теплоты $Q_{г.с}$ горячего теплоносителя, отведенной от двух ГПД, теплоты, трансформированной в АБХМ в холод, $Q_{г.А}$, и потерь теплоты $Q_{г.п}$ в системе возврата теплоносителя в ГПД приведены на рис. 3.

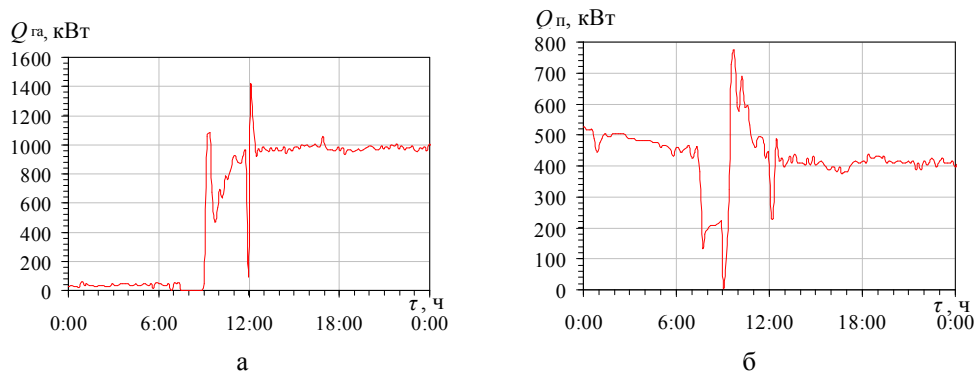


Рис. 2. Количество теплоты, использованной в АБХМ $Q_{га}$ (а) и сбрасываемой в атмосферу Q_n (б)

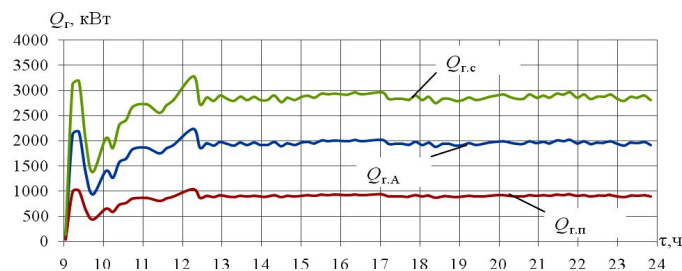


Рис. 3. Значения общего количества теплоты $Q_{г.с}$ горячего теплоносителя, отведенной от двух ГПД, теплоты, трансформированной в АБХМ в холод, $Q_{г.А}$, и потерь теплоты $Q_{г.п}$ в течение $\tau = 9^{00} - 24^{00}$ (28.07.2011) для базового варианта по данным мониторинга ($\tau = 0^{00} - 9^{00}$ – АБХМ отключена)

Из-за потерь теплоты $Q_{г.п}$ имеет место значительная невыработка холода. В свою очередь, дефицит холодопроизводительности лимитирует ее расходование на охлаждение воздуха на входе ГПД. Для того, чтобы сократить потери тепла, можно пойти путем повышения теплового потенциала части обратного теплоносителя его нагревом до 90°C в газовом котле, который всегда есть на предприятиях автономного энергообеспечения, и подавать снова в АБХМ, т.е. ввести дополнительный рециркуляционный контур с котлом. Однако остается нерешенной проблема понижения температуры обратного теплоносителя, подаваемого в узлы охлаждения ГПД, до $t_r \approx 70^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что применение двухступенчатой АБХМ, обеспечивающей снижение температуры теплоносителя на большую величину $\Delta t_{АБХМ}$, требует использования в качестве теплоносителя водяного пара или горячей воды с намного более высокой температурой $t_r = 140^\circ\text{C}$ по сравнению с температурой, при которой теплоноситель выходит из когенерационного модуля ГД на вход АБХМ: $t_r = 90^\circ\text{C}$.

Очевидно, целесообразным было бы использование в качестве низкотемпературной ступени такую ТХМ, в генераторе которой возможно охлажде-

ние теплоносителя до температуры ниже 70°C . К таким ТХМ относятся эжекторные ХМ (ЭХМ) на низкокипящих рабочих телах – хладонах. В экономайзерной секции генератора ЭХМ происходит нагрев жидкого хладона от температуры конденсации $t_k = 30...40^\circ\text{C}$ до температуры его кипения при высоком давлении в испарительной секции генератора. Именно в экономайзерной секции генератора ЭХМ в процессе нагрева конденсата хладона возможно охлаждение обратного теплоносителя до требуемой его температуры $t = 70^\circ\text{C}$ на входе в узлы охлаждения когенерационного модуля ГПД (рис. 4).

Целесообразным является повышение температуры горячего теплоносителя в самом когенерационном модуле ГПД выше стандартной $t_r = 90^\circ\text{C}$: $t_r \geq 90^\circ\text{C}$. При этом обратный теплоноситель с температурой $t_r \leq 70^\circ\text{C}$ подают в узлы охлаждения ГПД, а с более высокой температурой $t_r \geq 70^\circ\text{C}$ – непосредственно в УК) ГПД, минуя узлы охлаждения ГПД (рис. 5).

Значения холодопроизводительности одноступенчатых традиционной однопоточной $Q_{0(90)}$ и предложенной двухпоточной $Q_{0(93)}$ систем трансформации тепла когенерационных модулей ГПД приведены на рис. 6.

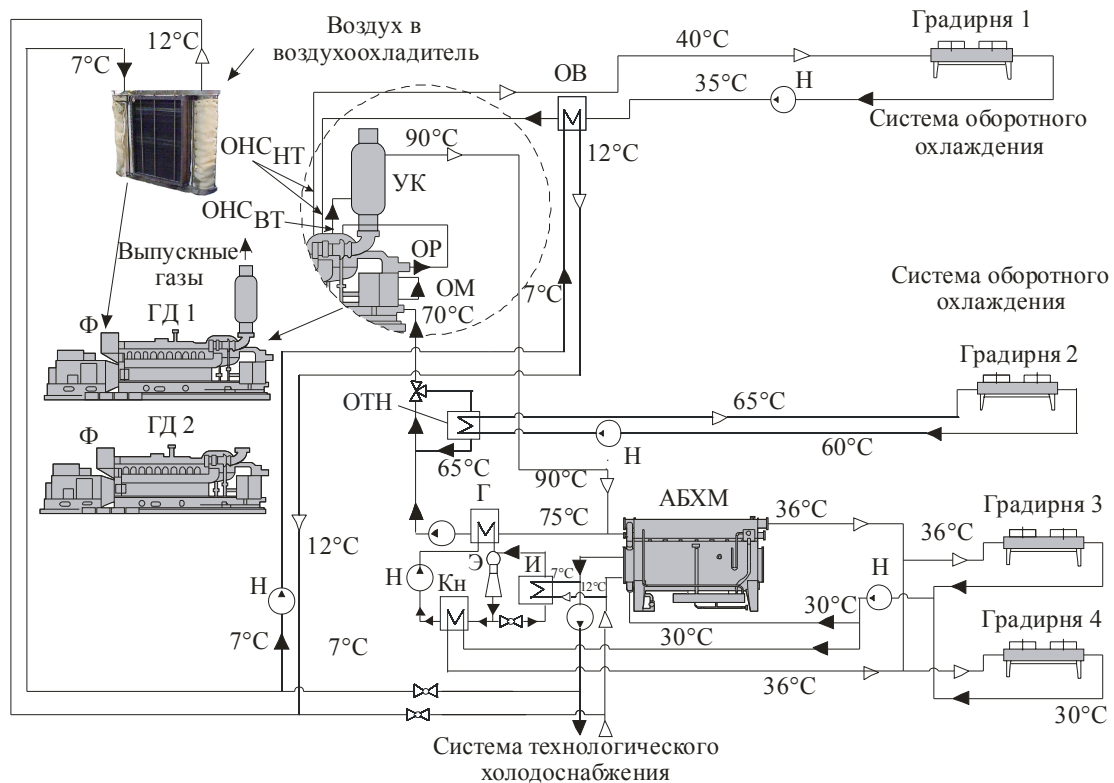


Рис. 4. Схема двухступенчатой системы трансформации теплоты когенерационного модуля ГПД: ГД – газодвигатель; Ф – фильтр на всасывании ГД; ОМ – охладитель масла; ОП – охладитель рубашки двигателя; УК – утилизационный котел; ОНС_{НТ} и ОНС_{ВТ} – низкотемпературная и высокотемпературная ступени охладителя наддувочной ГВС; ОВ – охладитель воды; ОТН – охладитель теплоносителя; Н – насос; градирня 2 – аварийного сброса тепла в атмосферу; ЭХМ: Э – эжектор; И – испаритель; Кн – конденсатор; Г – генератор

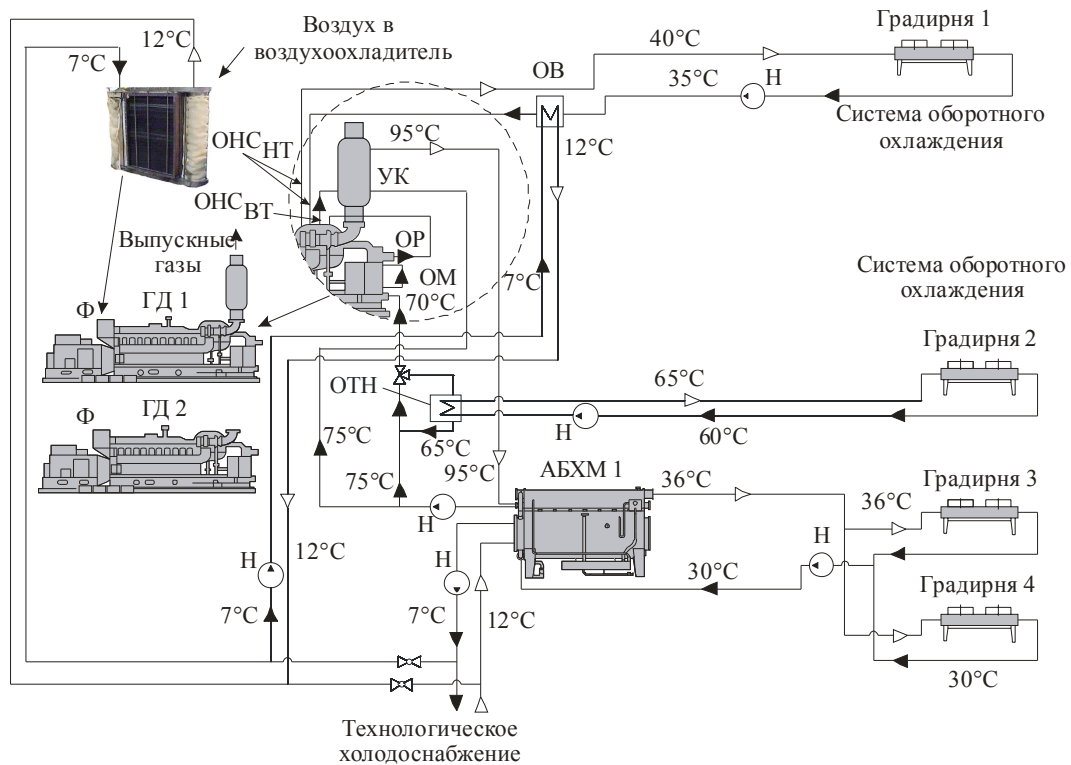


Рис. 5. Схема системы трансформации теплоты усовершенствованного когенерационного модуля ГПД JMS 420 GS с подводом обратного теплоносителя двумя потоками с разными температурами: ГД – газовый двигатель; Ф – фильтр на всасывании ГД; ОМ – охладитель масла; ОР – охладитель рубашки двигателя; УК – утилизационный котел; ОНС_{НТ} и ОНС_{ВТ} – низкотемпературная и высокотемпературная ступени охладителя наддувочной ГВС; ОВ – охладитель воды; ОТН – охладитель теплоносителя; Н – насос; Градирия 2 – аварийного сброса тепла в атмосферу

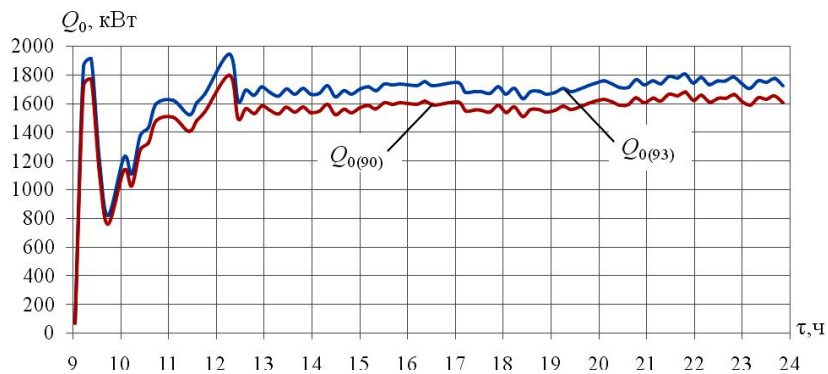


Рис. 6. Значения холодопроизводительности одноступенчатых традиционной однопоточной $Q_{0(90)}$ и двухпоточной $Q_{0(93)}$ систем трансформации тепла когенерационных модулей ГПД: $Q_{0(90)}$ – при $t_{г.вых} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($t_{г.вх} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$); $Q_{0(93)}$ – при $t_{г.вых} = 93\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($t_{г.вх} = 78\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Как видно, переход на двухпоточную систему трансформации тепла когенерационных модулей ГПД обеспечивает увеличение холодопроизводительности $Q_{0(93)}$ на 12 % по сравнению с традиционной однопоточной $Q_{0(90)}$.

Дальнейшие резервы повышения топливной эффективности тригенерационной установки завода ООО "Сандора" – "Pepsico Ukraine" связаны с использованием конденсата водяных паров, отводимого в процессе охлаждения воздуха в воздухоохлади-

телях кондиционеров, для впрыска в воздушный поток на входе градирен сухого типа системы оборотного охлаждения ГВС, т.е. переводом их в режим испарительного охлаждения с соответствующим снижением температуры воздуха до его температуры по мокрому термометру, а также с аккумуляцией холода для его использования при пиковых тепловых нагрузках на тригенерационную установку: при максимальных температурах наружного воздуха и технологических потребностях в холоде.

Выводы

Выявлены резервы повышения эффективности тригенерационной установки и обоснованы направления их реализации, обеспечивающие эффективную трансформацию тепла газовых двигателей в холод, используемый на технологические нужды и для самих двигателей (внутрицикловая тригенерация): охлаждение воздуха на входе, наддувочной ГВС с помощью АБХМ, и увлажнением наружного воздуха на входе градирни сухого типа; повышение температуры теплоносителя на выходе из ГПД в двухпоточной системе отвода тепла.

Литература

1. *Economic utilization of Biomass and Municipal Waste for power generation. Some energy lasts for generations [Text]. – GE Jenbacher Company Overview. – June 13, 2007. – 39 p.*

2. *Elsenbruch, T. Jenbacher gas engines a variety of efficient applications [Text] / T. Elsenbruch. – București, October 28, 2010. – 73 p.*

3. *GTI Integrated Energy System for Buildings. Modular System Prototype [Text] / G. Rouse, M. Czachorski, P. Bishop, J. Patel // GTI Project report 15357/65118: Gas Technology Institute (GTI). – January 2006. – 495 p.*

4. *Рыжков, С.С. Тригенерационная установка автономного энергообеспечения [Текст] / С.С. Рыжков, Н.И. Радченко, С.Г. Фордуй // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 10(97). – С. 55–60.*

5. *Radchenko, N., Ryzkov S., Forduy S. Trigenation plant for combined energy supply [Text] / N. Radchenko, S. Ryzkov, S. Forduy // Proceedings of the 14 International Symposium on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy: HTRSE–2012. – Szczecin, Poland, 2012. – P. 503–508.*

Поступила в редакцию 23.05.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Голиков, Одесская национальная морская академия, Украина.

НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРИГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

С.С. Рыжков, А.М. Радченко, С.Г. Фордуй

Проаналізована ефективність тригенерационної установки на базі когенераційних газопоршневих модулів JMS GE Jenbacher автономного енергозабезпечення заводу ТОВ "Сандора"–"Pepsico Ukraine" (Миколаївська обл.). Виявлені резерви підвищення ефективності як всієї тригенерационної установки, так і власне когенераційних модулів, обґрунтовані напрями їх реалізації, що забезпечують ефективну трансформацию тепла газових двигунів у холод, який використовується як на технологічні потреби, так і для самих газопоршневих двигунів (внутрішньоциклова тригенерация).

Ключові слова: внутрішньоциклова тригенерация, автономне енергозабезпечення, утилізація тепла, охолодження, газопоршневий двигун, абсорбційна холодильна машина.

APPROACHES OF ENCREASING EFFICIENCY OF TRIGENERATION PLANTS FOR INTEGRATED ENERGY SUPPLY

S.S. Ryzkov, A.N. Radchenko, S.G. Forduy

The efficiency of trigenation plant on the base of cogeneration reciprocating gas engine modules JMS GE Jenbacher of integrated energy system for factory "Sandora"–"Pepsico Ukraine" (Nikolayev region) was analyzed. The reserves for increasing the efficiency of the whole trigenation plant so as of the cogeneration modules were revealed and the approaches of their realization, providing efficient transforming the gas engine waste heat into a cold, used for technological requirements so as for cogeneration reciprocating gas engines themselves (in-cycle trigenation) were proved.

Key words: in-cycle trigenation, integrated energy supply, heat utilization, cooling, reciprocating gas engine, absorption chiller.

Рыжков Сергей Сергеевич – д-р техн. наук, проф., ректор Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина.

Радченко Андрей Николаевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры судовых электроэнергетических систем Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Фордуй Сергей Георгиевич – канд. техн. наук, технический руководитель направления энергоресурсов и энергосбережения, Pepsico Europe, Николаев, Украина, e-mail: serhiy.forduy@pepsico.com.