

УДК 621.57

С.С. РЫЖКОВ<sup>1</sup>, Н.И. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, С.Г. ФОРДУЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина  
<sup>2</sup>PepsiCo Europe, Николаев, Украина

## ТРИГЕНЕРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

*Проанализирована эффективность тригенерационной установки на базе когенерационных газопоршневых модулей JMS GE Jenbacher автономного энергообеспечения завода ООО "Сандора"—"Pepsico Ukraine" (Николаевская обл.). Выявлены резервы повышения эффективности трансформации сбросной теплоты газовых двигателей в холод, связанные с охлаждением воздуха на входе двигателей и наддувочной газозооной смеси абсорбционным термотрансформатором (внутрицикловая тригенерация), а также согласованием работы абсорбционного термотрансформатора с когенерационной системой газовых двигателей.*

**Ключевые слова:** тригенерация, автономное энергообеспечение, утилизация тепла, охлаждение, газопоршневой генератор, абсорбционная холодильная машина, топливная эффективность.

### Анализ проблемы и постановка цели исследования

В настоящее время все более широкое применение находят установки автономного электро-, тепло- и холодообеспечения, так называемые тригенерационные установки или интегрированные энергетические системы [1 – 3]. В качестве базовых двигателей в таких установках используются тепловые двигатели, работающие на природном газе и альтернативных газообразных топливах (биогаз и т.п.): газотурбинные и газопоршневые двигатели (ГПД) или переоборудованные для работы на газе традиционные дизель-генераторы (ДГ). Ряд ведущих двигателестроительных фирм именно для применения в установках автономного энергообеспечения наладили выпуск газовых двигателей (ГД) в когенерационном исполнении – оборудованных штатными теплообменниками для получения горячей воды или водяного пара за счет использования теплоты выпускных газов, наддувочного воздуха или газозооной смеси (ГВС), теплоты охлаждающей рубашку двигателя воды и смазочного масла [1, 2].

Поскольку с повышением температуры воздуха на входе термодинамическая эффективность тепловых двигателей и, соответственно, энергоустановок в целом существенно снижается (уменьшается КПД, возрастает удельный расход топлива двигателя), то восстановление рациональных входных параметров путем охлаждения воздуха на входе дает возможность поддерживать их высокую топливную экономичность, и прежде всего при неблагоприятных климатических условиях эксплуатации – высоких температурах наружного воздуха.

Для кондиционирования (охлаждения с осушением) воздуха на входе двигателей целесообразно задействовать холод, генерируемый в тригенерационной установке за счет сбросной теплоты двигателей и используемый обычно для внешнего потребления – в технологических процессах, комфортном и технологическом кондиционировании. Применение полученного холода для нужд самого двигателя (внутрицикловая тригенерация) обеспечивало бы не только улучшение его топливной эффективности и увеличение производства основного вида энергии – электрической, но и повышение коэффициента использования всей тригенерационной установки в условиях, когда потребление холода на технологические нужды носит, как правило, периодический характер. Известные же концепции повышения эффективности установок автономного электро-, тепло- и холодоснабжения ограничиваются решением круга задач, относящихся к внецикловому (для внешних потребителей) использованию холода [3], и в силу этого не обеспечивают реализацию дополнительных резервов, связанных с трансформацией сбросной теплоты в цикле самих энергоустановок.

**Цель исследования** – выявление резервов повышения эффективности трансформации сбросной теплоты тригенерационной установки

### Результаты исследования

Первая на Украине тригенерационная установка автономного электро-, тепло- и холодообеспечения введена в эксплуатацию на заводе ООО "Сандора"—"Pepsico Ukraine" (Николаевская обл.) в 2011 г. Проектирование и монтаж установки

выполнены ЧНПП "СИНАПС"–"GE Energy" (г. Киев) и ООО "Хладотехника" (г. Николаев). Тригенерационная установка включает 2 когенерационных газопоршневых двигателя (ГПД) JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher (электрическая мощность одного ГПД 1400 кВт, тепловая мощность 1500 кВт), 2 абсорбционных бромистолитиевых холодильных машины (АБХМ) AR-D500L2 Century (холодильной мощностью по 2000 кВт) и 2 центральных кондиционера SIC Jan HREBEC (Чехия) 1LG4223-8AB60 (холодопроизводительностью по 350 кВт и объемным расходом воздуха по 60000 м<sup>3</sup>/ч каждый). Отвод теплоты от охлаждающей воды газовой смеси (ГВС) ГПД и АБХМ осуществляется градирнями Евресо AT 28-528 систем оборотного охлаждения.

Теплота, отведенная от выпускных газов ГПД в утилизационном котле (УК), газовой смеси в высокотемпературной ступени охладителя наддувочной смеси (ОНС<sub>вт</sub>), от рубашки двигателя и смазочного масла в теплообменниках (ТО), используется в АБХМ для производства холода в виде охлажденной воды с температурой 7...8 °С. Охлажденная вода является холодоносителем 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 (рис. 1), а от туда – на всасывание наддувочных турбокомпрессоров (ТК) ГПД.



а



б

Рис. 1. Когенерационный модуль ГПД JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher (а) и теплоиспользующий центральный кондиционер охлаждения приточного воздуха машинного отделения (б)

Охладитель наддувочной газовой смеси (ОНС) ГПД состоит из высокотемпературной (утилизационной) ступени ОНС<sub>вт</sub>, первой по ходу ГВС после ТК, в которой охлаждение ГВС сопровождается нагревом воды, которая является теплоносителем для генератора АБХМ, и собственно охлаждающей низкотемпературной ступени ОНС<sub>нт</sub>. В ОНС<sub>нт</sub> теплота ГВС отводится системой оборотного охлаждения с градирней сухого типа.

Первый год эксплуатации тригенерационной установки подтвердил ее высокую экономичность благодаря исключению затрат электроэнергии на производство холода в результате замещения электроприводных пароконденсаторных холодильных машин теплоиспользующими АБХМ. Были также выявлены резервы дальнейшего совершенствования тригенерационной установки, и прежде всего в направлении повышения топливной эффективности ГПД (снижения потребления природного газа), сокращения расхода холода на кондиционирование воздуха машинного отделения (МО) и использования высвобождаемого холода

для снижения температуры воздуха на входе ТК и наддувочной ГВС 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<sub>нт</sub> 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. При этом возрастает удельный расход топлива по сравнению с номинальным режимом работы двигателя. Возможно даже полное прекращение подачи газа. Последнее происходит также при высоких температурах воздуха в зоне ГПД, когда отвод теплоты от корпуса конвекцией уменьшается и, соответственно, температурный уровень двигателя возрастает.

Усиленная вентиляция зон интенсивного тепловыделения двигателя, равно как и подача на вход ТК охлажденного воздуха с более низкой температурой (по сравнению с воздухом МО) возможны путем подвода вентиляционного воздуха непосредственно к этим зонам и фильтру на всасывании ТК ГПД отдельными воздуховодами от кондиционеров, а не подачей охлажденного в них воздуха в МО, как на рис. 1,б.

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<sub>ит</sub> 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.

Ниже приведены некоторые результаты обработки данных по температурам наружного воздуха  $t_{нв}$  и воздуха  $t_{вх}$  на всасывании ТК ГПД – во всасывающем тракте ТК после фильтра (рис. 2), электрической мощности  $N_e$  ГПД и удельному объемному расходу газа  $b_e$  (рис. 3) в течение суток (июль 2011), полученных в процессе автоматизированного мониторинга температур воздуха и параметров ГПД, анализ которых позволяет обосновать справедливость принципиальных решений по повышению топливной эффективности ГПД и тригенерационной установки в целом.

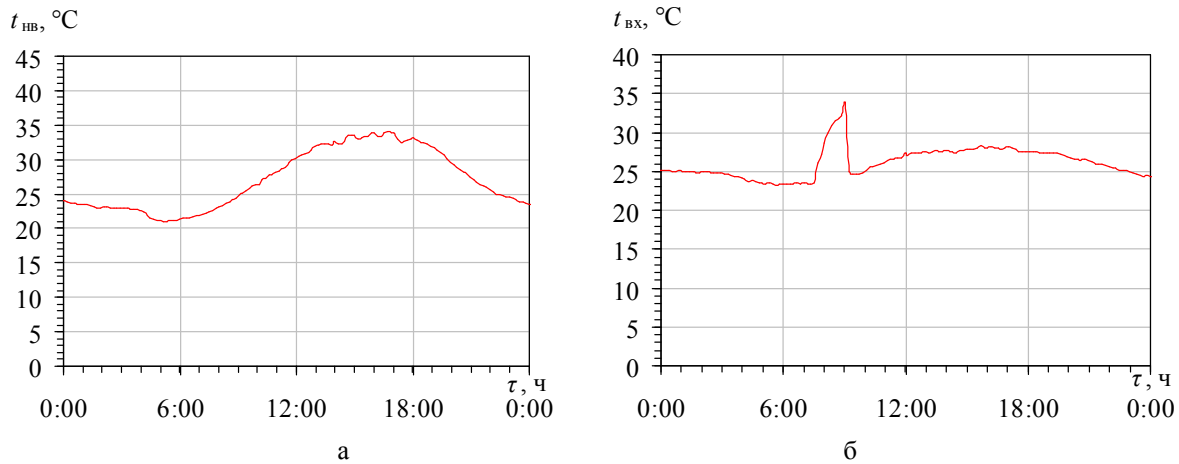


Рис. 2. Изменение температуры наружного воздуха  $t_{нв}$  (а) и воздуха  $t_{вх}$  на всасывании ТК ГПД (б) в течение суток (июль 2011)

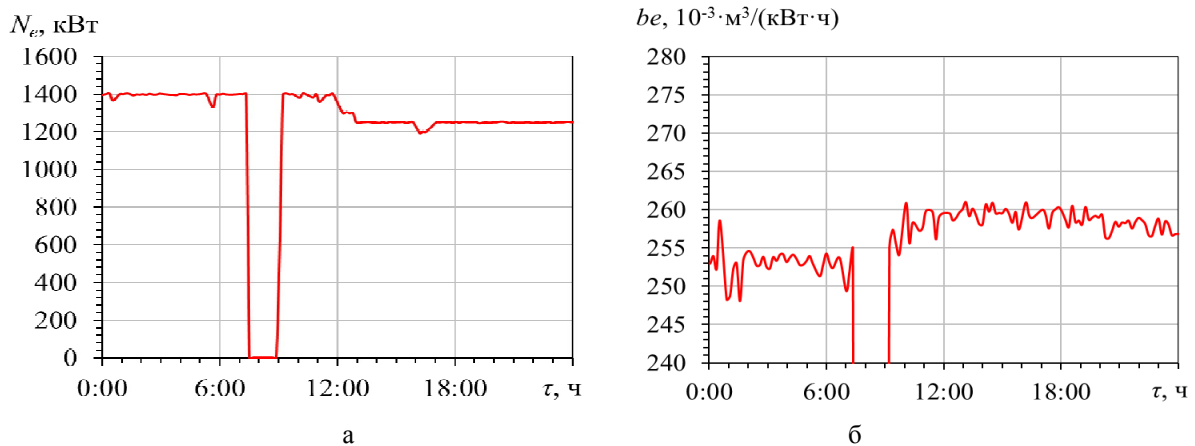


Рис. 3. Изменение электрической мощности  $N_e$  ГПД (а) и удельного объемного расхода газа  $b_e$  (б) при изменении температуры воздуха  $t$  на всасывании ТК в течение суток (июль 2011)

Из рис. 2 и 3 видно, что из-за резкого повышения температуры воздуха  $t_{вх}$  на всасывании ТК ГПД и соответственно в зоне ГПД (6-30...9-00 ч, кондиционер отключен) произошла аварийная остановка

ГПД (падение мощности  $N_e$  до нуля на рис. 3,а), а повышенные температуры наружного воздуха  $t_{нв}$  (воздушного потока в градирнях системы оборотного охлаждения ГВС и соответственно охлаждающей

воды на входе ОНС<sub>ит</sub>) и воздуха  $t_{вх}$  на всасывании ТК ГПД (рис. 2) вызывают работу ГПД на долевых режимах нагрузок (11-00...22-00 ч, рис. 3,а) с соответствующим возрастанием удельного расхода газа  $b_e$  примерно на  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$ , т.е. на 2 % по сравнению с работой ГПД на полной нагрузке при температурах  $t_{нв}$  и  $t_{вх}$  ниже  $25^\circ\text{C}$  (промежуток времени  $\tau = 2-00 \dots 6-00$  ч, рис. 3,б).

Свести к минимуму работу ГПД на долевых режимах (на участке  $\tau = 2-00 \dots 6-00$  ч, рис. 3) и тем самым уменьшить удельный расход газа  $b_e$  можно путем более глубокого охлаждения воздуха на входе ТК (подводом охлажденного в кондиционере воздуха отдельным воздухопроводом непосредственно к приемному фильтру на всасывании ТК, а не из МО) и стабилизируя температуру смеси  $t_c$  во впускном ресивере ГПД на уровне  $40^\circ\text{C}$  при повышенных температурах наружного воздуха  $t_{нв}$  на входе в градирни системы оборотного охлаждения ГВС.

С целью снижения температуры воды в системе оборотного охлаждения ГВС (по сравнению с охлаждением в градирне) можно использовать холод, производимый в АБХМ. Для этого хладоноситель, температура которого  $t_x = 7^\circ\text{C}$ , направляют из АБХМ в пластинчатый ТО, в котором дополнительно охлаждают воду, поступающую от градирни, перед ее подачей на охлаждение ГВС в ОНС<sub>ит</sub>. Следует отметить, что стабилизация теплового состояния ГПД достигается тепловлажностной подготовкой воздуха на входе ТК и охлаждением воды системы оборотного охлаждения ГВС до параметров, которые имеют место в прохладное и холодное время года (осень-весна), когда ГПД эксплуатируется при номинальной нагрузке и, соответственно, пониженных удельных расходах газа  $b_e = (246 \dots 250) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$  (рис. 4) против  $b_e = (258 \dots 260) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$  при высоких температурах воды в системе оборотного охлаждения ( $\tau = 2-00 \dots 6-00$  ч, рис. 3,б).

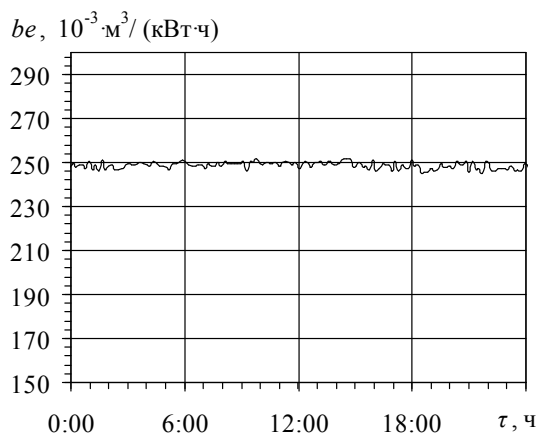


Рис. 4. Удельный объемный расход газа  $b_e$  при охлаждении смеси холодной водой: температура смеси  $t_c \approx 40^\circ\text{C}$

Еще одно направление повышения эффективности трансформации сбросной теплоты ГПД связано с согласованием работы абсорбционного термотрансформатора АБХМ с когенерационной системой ГПД. Так, в АБХМ отвод теплоты от горячего теплоносителя, поступающего от когенерационного модуля ГПД с температурой  $90^\circ\text{C}$ , сопровождается снижением его температуры не более чем на  $15^\circ\text{C}$  (характеристика АБХМ), т.е. из АБХМ в когенерационную систему ГПД возвращается теплоноситель с температурой не ниже  $75^\circ\text{C}$ . В то же время из условия поддержания теплового состояния двигателя на безопасном уровне температура теплоносителя на входе теплообменников ГПД (охладителей рубашки двигателя и масла) не должна превышать  $70^\circ\text{C}$ . Температурный уровень обратного теплоносителя хотя и весьма высокий (примерно  $75^\circ\text{C}$ ), но все же ниже требуемого для эффективной работы АБХМ (с высоким тепловым коэффициентом  $\zeta = 0,65 \dots 0,70$ ) уровня  $90^\circ\text{C}$  и его смешивание с прямым потоком теплоносителя на входе в АБХМ привело бы к ухудшению эффективности трансформации тепла в холод (снижению  $\zeta$ ). Поэтому избыточная теплота обратного теплоносителя сбрасывается в атмосферу в градирне аварийного сброса. Объемы сбросной теплоты составляют  $30 \dots 40\%$  спецификационной тепловой мощности когенерационного модуля ГПД ( $Q_T = 1500 \text{ кВт}$ ), что является причиной значительного недобора тепловой и холодильной мощностей: соответственно действительные  $Q_T \approx 1000 \text{ кВт}$  и  $Q_0 \approx 600 \text{ кВт}$  против спецификационных  $Q_T = 1500 \text{ кВт}$  и  $Q_0 = 1000 \text{ кВт}$ . Для подогрева обратного теплоносителя до требуемой температуры  $90^\circ\text{C}$  целесообразно задействовать пароводяной газовый котел, что позволяет вернуть в тригенерационный цикл примерно треть располагаемой тепловой мощности, трансформировать ее в АБХМ в холод и покрыть его дефицит, особенно острый в теплое время года. Следует отметить, что получаемая прибавка в холодильной мощности намного превышает ее потребность для охлаждения ГПД и МО. При существенном приросте производства холода (на  $40 \dots 50\%$ ) энергетические затраты на нагрев теплоносителя на  $15 \dots 20^\circ\text{C}$  в котле будут минимальными.

Реализация выявленных внутренних резервов тригенерационной установки завода ООО "Сандора" — "Pepsico Ukraine" позволяет нарастить электрическую и холодильную мощности до спецификационных показателей когенерационного модуля из двух ГПД JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher (суммарные электрическая мощность  $2800 \text{ кВт}$  и холодильная  $2000 \text{ кВт}$ ), используя всю его располагаемую тепловую мощность  $3000 \text{ кВт}$  в теплое время года (апрель–октябрь), когда потребности в тепловой

энергии минимальные, а в холоде, наоборот, максимальные. При этом сокращается потребление газа на производство холода электроприводными холодильными машинами на технологические нужды.

Результаты расчетов снижения потребления топливного газа  $\Delta B_e$  энергоустановкой из двух когенерационных модулей JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher (по 1400 кВт электрической мощности) благодаря трансформации в АБХМ всей сбросной

теплоты с производством холода для охлаждения воздуха на входе ТК ГПД, наддувочной ГВС и на технологические нужды  $\Delta B_{e, \text{сум. XM+ОНВ+ОВ}}$ , только на технологические нужды  $\Delta B_{e, \text{сум. XM}}$ , а также соответствующая экономия денежных средств на потребленный газ  $C_{T, \text{сум. XM+ОНВ+ОВ}}$  и  $C_{T, \text{сум. XM}}$  в течение апреля-октября 2011 г. приведены на рис. 5. При этом исходили из стоимости природного газа 500 дол. США за 1 тыс. м<sup>3</sup> газа.

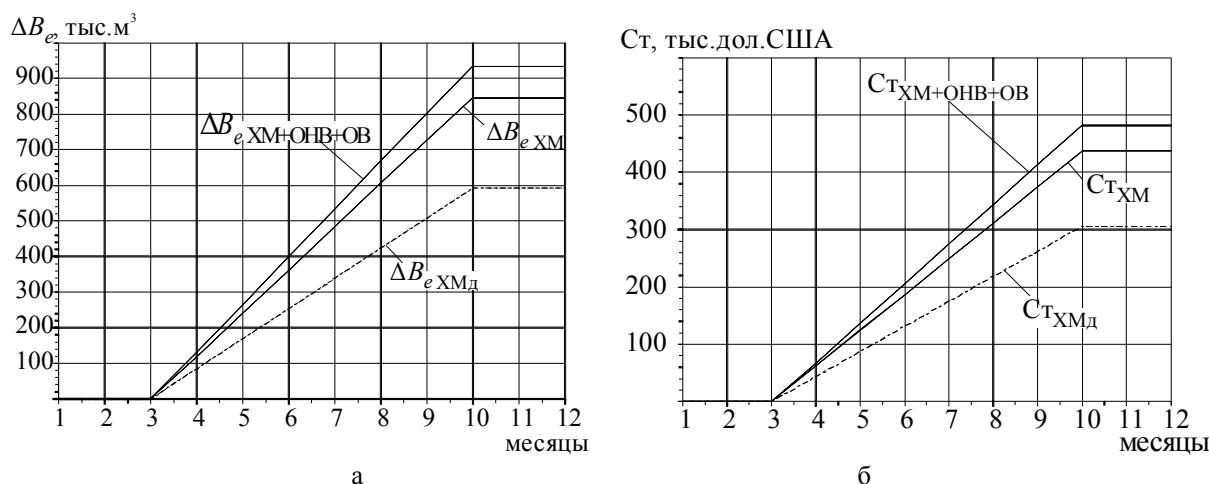


Рис. 5. Снижение потребления топливного газа  $\Delta B_e$  двумя ГПД J 420 GS-AO5 (а) и соответствующая экономия денежных средств на потребленный газ  $C_t$  (б) в течение апреля-октября 2011 г.

Как видно, экономический эффект от использования сбросного тепла двух ГПД J 420 GS-AO5 для производства холода в 2011 г. составляет 460 тыс. дол. США (экономия по газу – 920 тыс. м<sup>3</sup>). Дальнейшие резервы повышения топливной эффективности тригенерационной установки завода ООО "Сандора"–"Pepsico Ukraine" связаны с использованием конденсата водяных паров, отводимого в процессе охлаждения воздуха в воздухоохладителях 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

Проанализирована эффективность тригенерационной установки на базе когенерационных газопоршневых модулей GE Jenbacher автономного энергообеспечения завода ООО "Сандора"–"Pepsico

Ukraine" (Николаевская обл.) и выявлены резервы ее повышения, связанные с охлаждением воздуха на входе двигателей и наддувочной газозооной смеси абсорбционным термотрансформатором, использующим сбросную теплоту газовых двигателей (внутрицикловая тригенерация), а также согласованием работы абсорбционного термотрансформатора с когенерационной системой газовых двигателей. Определен экономический эффект, полученный за счет уменьшения потребления топливного газа газогенераторами на производство энергии для получения холода.

### 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.

Поступила в редакцию 11.05.2012

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

### ТРИГЕНЕРАЦІЙНА УСТАНОВКА АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

*С.С. Рыжков., М.І. Радченко, С.Г. Фордуй*

Проаналізована ефективність тригенераційної установки на базі когенераційних газопоршневих модулів JMS GE Jenbacher автономного енергозабезпечення заводу ТОВ "Сандора"—"Pepsico Ukraine" (Миколаївська обл.). Виявлені резерви підвищення ефективності трансформації скидної теплоти газових двигунів у холод, пов'язані з охолодженням повітря на вході двигунів і надувної газоповітряної суміші абсорбційним термотрансформатором (внутрішньоциклова тригенерація), а також узгодженням роботи абсорбційного термотрансформатора з когенераційною системою газових двигунів.

**Ключові слова:** тригенерація, автономне енергозабезпечення, утилізація тепла, охолодження, газопоршневий генератор, абсорбційна холодильна машина, паливна ефективність.

### TRIGENERATION PLANT FOR INTEGRATED ENERGY SUPPLY

*S.S. Ryzkov, N.I. Radchenko, S.G. Forduy*

The efficiency of trigeneration 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 improving the efficiency of transforming the gas engine waste heat into a cold with chilling the intake air and compressed gas-air mixture after the turbocharger by absorption chiller (in-cycle trigeneration) and by matching the performance of absorption chiller and cogeneration system of gas engines were exposed.

**Key words:** trigeneration, integrated energy system, heat utilization, cooling, reciprocating gas engine, absorption chiller, fuel efficiency.

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

**Радченко Николай Иванович** – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой кондиционирования и рефрижерации Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

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