



Т. В. ПАНЦЫРНАЯ
Кандидат биол.
наук, директор НТЦ
«Новые технологии
машиностроения»
ФГБОУ ВПО «Московский
государственный
машиностроительный
университет». Область
научных интересов:
биотехнология, экология,
микробиология, энергетика.

E-mail: tatiana.v.p@hotmail.com



В. А. ПАРАБИН
Замначальника НТК
«Биоэнергетика» НИЦ
«Курчатовский институт».
Область научных интересов:
энергетика, возобновляемые
источники энергии,
биоремедиация.

E-mail: parabinv@gmail.com

Представлен обзор актуальной научно-технической литературы по одному из ключевых направлений развития энергетики – повышению эффективности энергетических систем. Была продемонстрирована способность когенерационных и тригенерационных систем повышать энергоэффективность на электростанциях, в супермаркетах, торговых центрах, аэропортах и др. Кроме того, было показано, что эти системы обладают высоким потенциалом в области снижения выбросов парниковых газов. Также были продемонстрированы примеры полигенерационных систем и пути их оптимизации путем улучшения технико-экономических показателей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

генерация тепла и холода, парогазовая установка, тригенерация, энергоэффективность.



А. В. ДЬЯКОВ
Инженер НТЦ
«Новые технологии
машиностроения»
ФГБОУ ВПО «Московский
государственный
машиностроительный
университет». Область
научных интересов:
инженерия, трехмерное
прототипирование,
проектирование,
моделирование.

E-mail: diakov@mami.ru

Тригенерация как способ повышения энергетической эффективности¹ Обзорная статья

Введение

¹ Статья подготовлена с использованием материалов работы, выполняемой в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по направлению «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований и создание научно-технического задела в области энергоэффективности, энергосбережения и ядерной энергетики» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Госконтракт № 14.516.11.0029 от 22 марта 2013 г.

Реализация концепции устойчивого развития привела к появлению новых тенденций в области энергетики, а именно к направлению инвестиций и ориентации научно-технических и исследовательских работ на рациональную эксплуатацию природных ресурсов с целью удовлетворить нынешние и будущие потребности человека. В настоящее время к числу наиболее актуальных задач, стоящих перед обществом, относятся использование возобновляемых видов энергоносителей и повышение энергоэффективности существующих энергетических установок. Говоря об устойчивом развитии, также не стоит забывать о проводимых мероприятиях по снижению глобальных выбросов CO₂. В данном направлении проведено большое количество исследований

и опубликовано много научных работ фундаментального и прикладного характера. Настоящая статья представляет собой аналитический обзор основных результатов по данной тематике, полученных как научным сообществом, так и производителями энергии за последние 10 лет. С ее помощью будет возможно составить комплексное представление о тригенерации как способе повышения энергетической эффективности.

Системы энергоснабжения и энергоэффективность

Существует три основных компонента системы энергоснабжения: основной источник топлива, оборудование и системы производства и распределения, а также здания и сооружения конечного использования [34] (рис. 1). Следу-

ет обратить внимание на отдельные топливно-энергетические ресурсы, системы производства и распределения электричества, тепла и холода и системы конечного использования. К топливно-энергетическим ресурсам относятся уголь, нефть, природный газ, биомасса, солнечная, геотермальная, ядерная и другие виды энергии. Эти виды топлива должны быть преобразованы (в большинстве случаев путем сжигания) для производства электроэнергии, тепла и холода. В данной концепции системами производства и распределения считаются электроэнергия, тепло и холод (например, холодная вода), которые расходуются для достижения конечных целей: запуска оборудования, освещения, обогрева и охлаждения зданий. Выбор первичного топливного сырья, оборудования для производства и передачи электроэнергии, тепла и холода, выбор места производства и путей распространения продукции – все это влияет на конечную стоимость полученной энергии и на эффективность соотношения выхода произведенной энергии к количеству энергии, потраченной на ее производство [34]. Объединение трех компонентов позволяет энергетической системе быть более энергоэффективной.

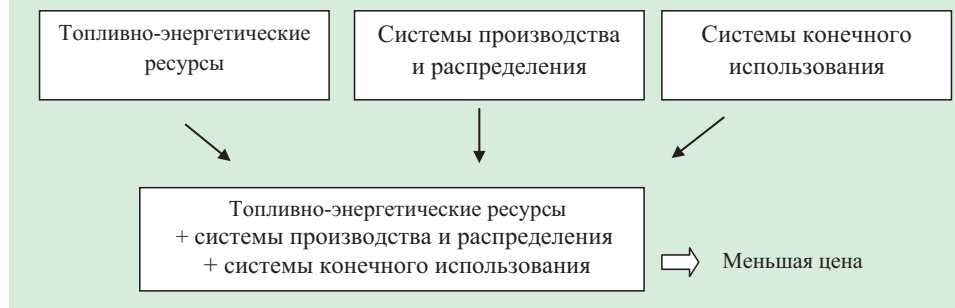
Наибольшая энергоэффективность достигается благодаря улучшению эффективности систем производства и распределения электричества, тепла и холода. В процессе горения или преобразования первичных энергоносителей для производства электричества две трети энергии, заключенной в топливе, превращаются в побочный продукт – тепло – и выбрасываются производителями электроэнергии.

Чтобы достичь эффективности использования первичного топлива, большая часть энергии, содержащейся в первичном топливе, должна быть преобразована в полезную энергию. Энергоэффективность определяется по тому, сколько энергии каждой единицы основного топлива используется для производства энергии как конечного продукта. Наилучший результат достигается, когда на каждую единицу потребляемой энергии полезный выход будет как можно ближе к 100% от первоначального содержания энергии в первичном топливе. Стоит отметить, что энергосбережение может рассматриваться как альтернативный источник энергии, так как его внедрение позволяет снизить потребление энергии, необходимой для определенного вида деятельности, без сокращения экономической активности или качества жизни в зависимости от области ее применения.

В большинстве случаев энергосбережение может быть достигнуто в три этапа:

- устранение потери энергии: требуются минимальные инвестиции при условии, что существующие объекты используются надлежащим образом;
- модификация существующих объектов с целью улучшить их энергоэффективность;
- развитие новых технологий, которые могут обеспечить меньшее потребление энергии на единицу производимого продукта.

Рис. 1. Энергетическая система



Когенерация и тригенерация

Интерес к системам полигенерации

Существует большое количество технологий, которые могут быть применены для сбережения энергии в различных сферах, в том числе в жилом секторе, на транспорте, в промышленности и торговле. За последние годы рост спроса на энергию и проблемы, связанные с изменением климата, привлекли повышенное внимание исследователей к высокопроизводительным системам полигенерации. Такие системы способны снижать потребление ископаемого топлива и объемы выбросов парниковых газов. Фактически в системах полигенерации комбинированным способом производится энергия различных видов (тепло, холод, электричество) с использованием только одного первичного источника энергии. Когенерационные и тригенерационные системы являются перспективными технологиями, позволяющими снизить энергетические затраты по сравнению с традиционными отдельными производителями энергии. Кроме того, интерес к полигенерации обусловлен тем, что никакой прямой цикл производства энергии не может обеспечить унитарной эффективности, в связи с чем большое количество первичной энергии теряется впустую в процессе преобразования. Когда конечным потребителям, помимо электроэнергии, необходимо тепло, может быть применена когенерация (комбинированное производство тепла и электроэнергии).

На протяжении многих лет различные отрасли промышленности, например пищевая, целлюлозно-бумажная и деревообрабатывающая промышленность, используют когенерацию энергии как средство удаления отходов и получения энергии. В когенерационной системе бросовое тепло используется для гражданского или промышленного применения. Однако выгода от такой системы не всегда очевидна из-за сложности и дополнительной стоимости соответствующей установки, поэтому не во всех случаях ее использование является экономически целесообразным и привлекательным. В быту эта система дает значительную экономию энергии только в холодный сезон, когда требуется много тепла на отопление помещений [3]. Таким образом, следующим шагом на пути к созданию энергоэффективного жилья могут быть тригенерационные системы (системы комбинированного производства электроэнергии, тепла и холода), которые способны удовлетворить потребности конечных потребителей в электричестве, отоплении и охлаждении и обеспечить экономию в течение всего года. При правильной разработке и исполнении систем тригенерация открывает очень интересные перспективы как для общих нужд [8, 36], так и для гражданского [4, 9, 21, 24, 35, 39] и промышленного использования [5, 14].

Пути оптимизации систем тригенерации

В наиболее общем виде систему тригенерации можно представить как систему, состоящую из тягача (двигателя Отто, или дизельного двигателя внутреннего сгорания, или газовой турбины) и вспомогательных машин: котла, компрессорных и абсорбционных охладителей, тепловых насосов, двунаправленной связи с электрической сетью и (редко) систем хранения тепла и холода [3]. Такая система гораздо сложнее и дороже, чем система когенерации, следовательно, перед ее внедрением исключительно важно провести очень точный технико-экономический анализ. Повышенная сложность системы тригенерации обуславливает также трудность такого анализа из-за большого числа переменных, которые должны быть учтены. Среди них наиболее важными являются потребности конечных пользователей и операционная политика. Необходимо точное распределение потребностей (включая их пиковые значения и формы) по часам на протяжении года. В течение долгого времени операционная политика была зафиксирована априори, что ограничивало функционирование системы в плане удовлетворения электрических или тепловых нужд потребителей. Такой выбор зачастую был неоптимальным, что привело к появлению боль-

шого числа работ, направленных на оптимизацию операционной политики. В общем, сегодня существуют две основные тенденции выявления путей оптимизации систем тригенерации. Первая заключается в том, что проводимые исследования анализируют системы и их компоненты в мельчайших подробностях [6, 7, 17], в то время как предлагаемый метод оптимизации не очень сложный. Вторая тенденция прослеживается в работах, где основной акцент делается на математическое описание/моделирование оптимизации [2, 10, 32, 33, 38] с небольшой детализацией системы с инженерной точки зрения.

Недавно несколько исследовательских групп предложили расширенные анализы, учитывающие экологические и правовые ограничения, а также использование систем хранения тепла и холода [12, 20, 22, 25–28], однако и в них преимущество принадлежит математической модели.

Помимо работ по оптимизации технологий тригенерации, активно ведутся исследования по внедрению так называемых зеленых технологий в энергетику. Известно, что биомасса является вторым по величине источником возобновляемой энергии [30]. В настоящее время существует большое число разнообразных методов преобразования биомассы в более ценные продукты: жидкие и газообразные виды топлива и химические продукты посредством термохимической, биохимической или химической конверсии [15]. Однако большинство из этих технологий, возможно, неконкурентоспособны по цене на данном этапе разработки. В настоящее время ресурсы биомассы в основном используются в производстве тепловой и электрической энергии [11, 16, 30]. Прямое сжигание и совместное сжигание биомассы с углем являются наиболее распространенными методами ее преобразования, и в ближайшем будущем они имеют значительный потенциал для обеспечения крупномасштабного применения биомассы для энергетических целей [18]. Другие технологии термохимической конверсии биомассы, например газификация, осуществимы и потенциально более эффективны по сравнению с традиционным сжиганием. Тем не менее этим технологиям либо не хватает проработанности и надежности, либо они не являются экономически оправданными для крупномасштабного использования.

На предприятии, использующем когенерацию или тригенерацию для производства энергии, продукты, получаемые на выходе (тепло и электроэнергия и/или холод), фундаментально отличаются друг от друга с точки зрения качества. Таким образом, использование обычного энергетического анализа на основе первого закона термо-

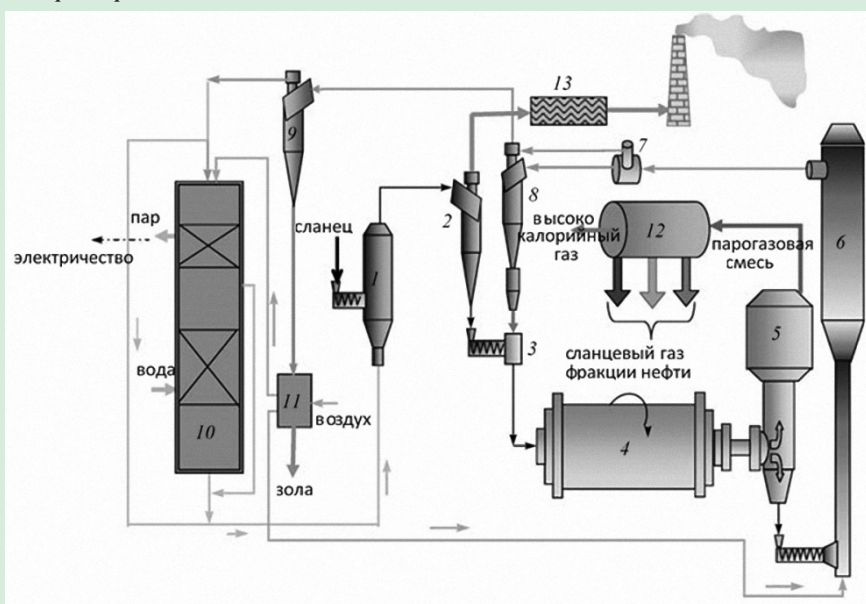
динамики не может адекватно оценить экономические соотношения между затраченной работой и выходом тепла. Поэтому более уместно анализировать эффективность предприятия, использующего когенерацию или тригенерацию для производства энергии, продуктов, на основе второго закона термодинамики [23, 37]. Так, например, в литературе оценен термоэкономический потенциал паротурбинной установки для тригенерации на заводах, имеющих четыре разные структуры и использующих биомассу (древесные отходы) в качестве источника энергии [23]. Авторами были рассмотрены и оценены четыре различные конфигурации заводов. Их экономическая эффективность оценивалась с учетом различных экономических и рабочих параметров, поскольку изменялись только цена топлива и цена на электроэнергию. На предприятии 1 генерируемый перегретый пар с высоким давлением подается на удовлетворение потребностей в технологическом тепле, а также на производство охлажденной воды в абсорбционной холодильной машине. На предприятиях 2 и 3 пар извлекают на соответствующих стадиях из турбины и направляют на обеспечение нужд в технологическом тепле и на производство охлажденной воды в абсорбционной холодильной машине. Мощность пара, генерируемого на предприятии 2, достаточна для удовлетворения внутренних потребностей. На предприятии 3 генерируется избыток электроэнергии для продажи обратно на подстанцию. На предприятии 4 насыщенный пар низкого давления генерируется для удовлетворения потребностей в технологическом тепле, а электроэнергия покупается у предприятий коммунального хозяйства. Для всех предприятий было установлено, что наибольшее разрушение эксергии (= около 60%) происходит в печи. Разрушение эксергии в паровом барабане является следующим по значимости и колеблется в пределах от 11 до 16%. Также было отмечено, что общая стоимость производства уменьшается с давлением пара и увеличивается с температурой пара [23].

Недавняя исследовательская работа коллектива из Бразилии была направлена на изучение термодинамических характеристик и выбросов углекислого газа парокompрессионной биотригенерационной системы [29]. Система состоит из двигателя внутреннего сгорания с принудительным зажиганием (низкого сжатия), питающего электрогенератор, парокompрессионного теплового насоса с электрическим приводом и пикового котла. Часть потребностей в нагреве

было удовлетворено путем отбора отработанного тепла от двигателя и теплового насоса, тем самым было достигнуто снижение общего потребления топлива. Был проведен сравнительный анализ системы тригенерации на основе биотоплива и системы на основе обычного ископаемого топлива без рекуперации отработанного тепла. Он показал, что в зависимости от относительных значений энергетических потребностей и характеристик компонентов может быть достигнуто

Рис. 2. Технология термической переработки сланца УТТ-3000 [37]:

1 – флэш-сушилка; 2 – циклон сухого сланца; 3 – смеситель; 4 – реактор пиролиза; 5 – пылеотделитель; 6 – флэш-печь; 7 – делитель потока; 8 – зольный циклон; 9 – циклон обработки продуктов сгорания; 10 – котел-утилизатор; 11 – воздушонагреватель; 12 – конденсатор; 13 – фильтр



значительное снижение первичного потребления энергии (до 50%) и выбросов CO_2 (до 5% от первоначальной эмиссии) в случае комбинирования биотоплива и тригенерации.

Актуальный мультипараметрический анализ был проведен для определения целесообразности использования технологий возобновляемых источников энергии для тригенерации [13]. Авторами была разработана модель для описания и оценки тригенерации. Система тригенерации была нацелена на самообеспечение и одновременно удовлетворяла потребности коммерческого здания в охлаждении, отоплении и электроэнергии. В нее включены четыре ключевые подсистемы: тепловая фотоэлектрическая (солнечная) подсистема, топливный элемент, микротурбина и абсорбционная водоохлаждающая система. Обычно система тригенерации анализируется на основе снижения затрат, полученного благодаря ее внедрению, без учета используемой энергии и уровня выбросов углекислого газа. В работе [13] был

представлен анализ системы тригенерации с помощью нескольких критериев с точки зрения:

- снижения себестоимости операций;
- энергосбережения;
- минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

Для разработанной автором модели системы тригенерации показано, что комплектация системы тригенерации, оптимальная с точки зрения снижения эксплуатационных затрат, повышения энергосбережения и минимизации воздействия на окружающую среду, представляет собой систему, состоящую из микротурбин (80%), фотоэлектрических тепловых элементов (10%) и топливных элементов (10%). Методология, представленная в этом исследовании, представляет собой хорошую базу для прагматичного подхода к проектированию систем возобновляемых источников энергии для поддержки использования тригенерации.

Системы тригенерации в электроэнергетике России

В настоящее время основу промышленного потенциала российской энергетики составляют более 700 электростанций с общей мощностью 227 ГВт и более 2,5 млн км линий электропередачи всех классов напряжений [1]. Во главе структуры электрогенерирующих мощностей России стоят теплоэлектростанции, гидроэлектростанции и атомные электростанции. Одной из наиболее эффективных технологий использования твердых видов топлива для производства энергии, применяемых в России, является технология УТТ-3000, представленная на рис. 2.

После строительства крупнейшей в Европе газовой турбины в 1970 году Россия потеряла лидерство в данной области. Реконструкция и модернизация задействованных в настоящее время отечественных газовых турбин позволяют

1. Волков Э.П., Костюк В.В. Новые технологии в электроэнергетике России // Вестник РАН. 2009. №8. С. 675–686.
2. Arcuri P., Florio G., Fragiaco P. A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex // Energy. 2007. Vol. 32. P. 1430–1447.
3. Arosio S., Guizzoni M., Pravettoni F. A model for micro-trigeneration systems based on linear optimization and the Italian tariff policy // Applied Thermal Engineering. 2011. Vol. 31. P. 2292–2300.
4. Arteconi A., Brandoni C., Polonara F. Distributed generation and trigeneration: energy saving opportunities in Italian supermarket sector // Applied Thermal Engineering. 2009. Vol. 29, N 8–9. P. 1735–1743.
5. Bassols J., Kuckelkorn B., Langreck J. et al. Trigeneration in the food industry // Applied Thermal Engineering. 2002. Vol. 22. P. 595–602.
6. Campanari S., Boncompagni L., Macchi E. Microturbines and trigeneration: optimization strategies and multiple engine configuration effects // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2004. Vol. 126. P. 92–101.
7. Campanari S., Macchi E. Technical and tariff scenarios effect on microturbine trigenerative applications // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2004. Vol. 126. P. 581–589.
8. Cardona E., Piacentino A. A methodology for sizing a trigeneration plant in mediterranean areas // Applied Thermal Engineering. 2003. Vol. 23. P. 1665–1680.
9. Cardona E., Piacentino A., Cardona F. Energy saving in airports by trigeneration. Part I: assessing economic and technical potential // Applied Thermal Engineering. 2006. Vol. 26. P. 1427–1436.
10. Chicco G., Mancarella P. Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization // Energy. 2009. Vol. 34, N 3. P. 261–273.
11. Chinese D., Meneghetti A. Optimisation models for decision support in the development of biomass-based industrial district-heating networks in Italy // Appl. Energy. 2005. Vol. 82, N 3. P. 228–254.
12. Cho H., Mago P.J., Luck R. et al. Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme // Applied Energy. 2009. Vol. 86. P. 2540–2549.
13. Chua K.J., Yang W.M., Wong T.Z. et al. Integrating renewable energy technologies to support building trigeneration – A multi-criteria analysis // Renewable Energy. 2012. Vol. 41. P. 358–367.
14. Colonna P., Gabrielli S. Industrial trigeneration using ammonia-water absorption refrigeration systems (AAR) // Applied Thermal Engineering. 2003. Vol. 23. P. 381–396.
15. Delattin F., De Ruyck J., Bram S. Detailed study of the impact of co-utilization of biomass in a natural gas combined cycle power plant through perturbation analysis // Appl. Energy. 2009. Vol. 86, N 5. P. 622–629.
16. Filho P.A., Badr O. Biomass resources for energy in North-Eastern Brazil // Appl. Energy. 2004. Vol. 77, N 1. P. 51–67.
17. Godefroy J., Boukhanouf R., Riffat S. Design, testing and mathematical modelling of a small-scale CHP and cooling system (small CHP-ejector trigeneration) // Applied Thermal Engineering. 2007. Vol. 27. P. 68–77.
18. Hughes E.E., Tillman D.A. Biomass cofiring: status and prospects 1996 // Fuel Processing Technol. 1998. Vol. 54. P. 127–142.
19. IEA – International Energy Agency Report, Combined heat and power – Evaluating the benefits of greater global investment // International Energy Agency. URL: http://www.iea.org/Papers/2008/chp_report.pdf.

увеличить общую эффективность производства энергии из природного газа примерно на 50% [1]. Парогазовые установки важны для теплоснабжения. Внедрение когенерации тепла и электроэнергии на существующих заводах позволит повысить их эффективность без смены существующего поколения оборудования, электрических сетей и переобучения персонала.

Заключение

Обзор актуальной научно-технической литературы показал, что повышение энергоэффективности существующих энергетических установок сейчас является одним из ключевых направлений развития энергетики. В настоящее время распределенные энергетические системы представляют собой менее 10% всей производимой в мире энергии [19]. Было показано, что когенерационные и тригенерационные системы являются перспек-

тивными технологиями, обладающими высоким потенциалом в области снижения выбросов парниковых газов. Кроме того, была подтверждена их способность повысить энергоэффективность электростанций, гостиниц, больниц, супермаркетов, аэропортов и торговых центров [31]. В последние годы возможность достижения экономии энергии с помощью систем тригенерации возросла во многих странах благодаря улучшению инфраструктуры в населенных городских центрах, стимулирующим законодательствам, энергетическим положениям и соответствующим налоговым льготам в этих странах. Однако существующие системы тригенерации зачастую не оптимизированы, в связи с чем выявлена необходимость проведения дальнейших исследований с целью поиска путей повышения их эффективности путем улучшения технико-экономических показателей существующих систем тригенерации.

20. Kavvadias K.C., Maroulis Z.B. Multi-objective optimization of a trigeneration plant // *Energy Policy*. 2010. Vol. 38, N 2. P. 945–954.
21. Kavvadias K.C., Tosios A.P., Maroulis Z.B. Design of a combined heating, cooling and power system: sizing, operation strategy selection and parametric analysis // *Energy Conversion and Management*. 2010. Vol. 51, N 4. P. 833–845.
22. Lai S.M., Hui C.W. Integration of trigeneration system and thermal storage under demand uncertainties // *Applied Energy*. 2010. Vol. 87, N 9. P. 2868–2880.
23. Lian Z.T., Chua K.J., Chou S.K. A thermoeconomic analysis of biomass energy for trigeneration // *Applied Energy*. 2010. Vol. 87. P. 84–95.
24. Lin L., Wang Y., Al-Shemmeri T. et al. An experimental investigation of a household size trigeneration // *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27. P. 576–585.
25. Lozano M.A., Carvalho M., Serra L.M. Operational strategy and marginal costs in simple trigeneration systems // *Energy*. 2009. Vol. 34. P. 2001–2008.
26. Lozano M.A., Ramos J.C., Serra L.M. Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints // *Energy*. 2010. Vol. 35. P. 794–805.
27. Mago P.J., Chamra L.M. Analysis and optimization of CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. P. 1099–1106.
28. Mago P.J., Chamra L.M., Ramsaya J. Micro-combined cooling, heating and power systems hybrid electric-thermal load following operation. *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30, N 8–9. P. 800–806.
29. Parise J.A.R., Castillo Martínez L.C., Pitanga Marques R. et al. A study of the thermodynamic performance and CO₂ emissions of a vapour compression bio-trigeneration system // *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31. P. 1411–1420.
30. REN21. Renewables 2007, Global status report // Worldwatch Institute. URL: <http://www.worldwatch.org/files/pdf/renewables2007.pdf>.
31. Rocha M.S., Andreos R., Simões-Moreira J.R. Performance tests of two small trigeneration pilot plants // *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 41. P. 84–91.
32. Rong A., Lahdelma R. An efficient linear programming model and optimization algorithm for trigeneration // *Applied Energy*. 2005. Vol. 82. P. 40–63.
33. Rong A., Lahdelma R., Luh P.B. Lagrangian relaxation based algorithm for trigeneration planning with storages // *European Journal of Operational Research*. 2008. Vol. 188. P. 240–257.
34. Solmes L.A. Energy efficiency: Real time energy infrastructure investment and risk management. Dordrecht; Heidelberg; London; New York: Springer, 2009. 205 p.
35. Sugiarta N., Tassou S.A., Chaer I. et al. Trigeneration in food retail: an energetic, economic and environmental evaluation for a supermarket application // *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29, N 13. P. 2624–2632.
36. Temir G., Bilge D. Thermoeconomic analysis of a trigeneration system // *Applied Thermal Engineering*. 2004. Vol. 24. P. 2689–2699.
37. Wang J., Dai Y., Gao L. Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry // *Appl. Energy*. 2009. Vol. 86, N 6. P. 941–948.
38. Wang J.-J., Jing Y.-Y., Zhang C.-F. et al. A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system // *Energy Policy*. 2008. Vol. 36, N 10. P. 3823–3832.
39. Zihir D., Poredos A. Economics of a trigeneration system in a hospital // *Applied Thermal Engineering*. 2006. Vol. 26. P. 680–687.