

DOI: 10.18721/JEST.25201
УДК 620.91-93:620.97

А.В. Клименко, В.С. Агабабов, П.Н. Борисова

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

СОВМЕСТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПРОИЗВЕДЕННЫХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ (ОБЗОР)

Рассмотрены публикации в научно-технической литературе, посвященные вопросам одного из возможных направлений повышения эффективности работы объектов энергетики – создания мультигенерационных систем. В состав таких систем входят объекты генерации энергоносителей и потребители. Для повышения эффективности работы объектов генерации, вынужденных в периоды сезонных и суточных провалов электрической и тепловой нагрузки работать в неноминальных режимах с пониженной термодинамической эффективностью, организовывается за счет использования неостребованных мощностей совместная с электроэнергией и теплом генерация иных произведенных энергоносителей, таких как, например, холод, водород, сжатый воздух и др. Это позволяет обеспечивать генерацию электроэнергии и тепла в режимах, близких к номинальным, а также организовывать совместную с электроэнергией и теплом генерацию и иных произведенных энергоносителей с более высокими показателями эффективности, чем при раздельном производстве. Рассмотрены различные критерии оценки эффективности мультигенерационных систем, а также особенности эксплуатации объектов энергетики в условиях России.

Ключевые слова: повышение эффективности, выравнивание графиков нагрузки объектов генерации, совместная генерация энергоносителей различных видов, критерии оценки эффективности мультигенерационных систем, особенности эксплуатации объектов энергетики в условиях России.

Ссылка при цитировании:

А.В. Клименко, В.С. Агабабов, П.Н. Борисова. Совместная генерация произведенных энергоносителей (обзор) // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 6–29. DOI: 10.18721/JEST.25201.

A.V. Klimenko, V.S. Agababov, P.N. Borisova

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

COMBINED GENERATION OF PRODUCED ENERGY CARRIERS: REVIEW

The article presents a review of scientific and technical publications dedicated to one of the possible directions of efficiency improving generation facilities, i.e., the development of multi-generation energy systems. Such systems include energy generation facilities and consumers. This technology is proposed for generation facilities which forced to work in off-nominal conditions during seasonal and daily off-peak periods of electric and thermal loads, which decreases their thermodynamic efficiency. Generation of other produced energy carriers, such as cold, hydrogen, compressed air, etc., is organized together with electricity and heat due to using unclaimed capacities. It allows to provide generation of electricity and heat in the modes close to nominal, and also to organize combined generation of electricity and heat and other

produced energy carriers with higher efficiency criteria than with separate generation. Various efficiency evaluation criteria of multi-generation systems are considered, as well as operational features of generation facilities in Russia.

Keywords: efficiency improving, load curves leveling of generation facilities, combined generation of energy carriers, efficiency evaluation criteria of multi-generation systems, operational features of generation facilities in Russia.

Citation:

A.V. Klimenko, V.S. Agababov, P.N. Borisova, Combined generation of produced energy carriers (review), *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25 (2) (2019) 6–29, DOI: 10.18721/JEST.25201.

Введение. Одним из возможных путей повышения эффективности преобразования энергии топлива является создание технологий комбинированной, или совместной, генерации энергоносителей различных видов. Так, на сегодняшний день в мировой энергетике, в том числе и в России, широкое распространение получили теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) с паротурбинными установками (ПТУ) теплофикационного типа, производящие совместно наиболее востребованные в промышленности и в социальной сфере энергоносители – электроэнергию и тепло из единственного первичного источника энергии – топлива [1, 2]. Они явились альтернативой разделному производству электроэнергии на электростанциях с паротурбинными установками конденсационного типа (КЭС) и тепла в котельных с применением водогрейных либо паровых котлов.

Многочисленные теоретические, подкрепленные результатами эксплуатации установок совмещенной генерации исследования, проведенные, в основном, в России, показали, что в большинстве случаев термодинамическая эффективность совмещенной генерации электроэнергии и тепла на ТЭЦ оказывается выше, чем тот же показатель при их разделном производстве на КЭС и в котельных [1, 3, 4].

Уже это обстоятельство делает целесообразным постановку вопроса о совместном производстве различных энергоносителей, в которых нуждается конечный потребитель. Такими энергоносителями могут быть холод,

водород, кислород, метан и др. Более того возможны варианты, когда наряду с энергоносителями производятся продукты, не относящиеся к их числу, но имеющие рыночную стоимость (например, химические удобрения).

Исследованиям совместного производства трех и более энергоносителей посвящено значительное число работ, большая часть которых опубликована в последние 20–25 лет. Начать их обзор необходимо с нескольких важнейших определений так, чтобы исключить в дальнейшем изложении различную трактовку используемых терминов.

Используемые определения

Авторы констатируют, что в литературе единое, общепринятое определение, что же следует понимать под совместным производством произвольного числа энергоносителей и полезных продуктов, на сегодня отсутствует. Предлагается использовать следующее определение. *Мультигенерация* – совместное одновременное производство энергоносителей, а также иных продуктов, (в сумме не менее двух) на объекте генерации с использованием технологически связанных энергогенерирующих установок.

При этом, для удобства описания технического решения в каждом конкретном случае, используются термины *бигенерация*, *трехкратная*, *четырёхкратная* и т. д. мультигенерация, в зависимости от числа производимых энергоносителей и полезных продуктов.

Вместе с тем целесообразно сохранить устоявшийся термин *когенерация* для получившего широкое распространение совместного производства электроэнергии и тепла. Это же касается и такого общепринятого термина как *тригенерация*, когда совместно производятся электроэнергия, тепло и холод из одного первичного энергоносителя на технологически связанных между собой установках.

Подчеркнем, что мультигенерация в любом виде подразумевает централизованную поставку потребителю необходимых для него энергоносителей и продуктов.

Зарубежный опыт

Достаточно подробный анализ более, чем пятисот зарубежных публикаций, посвященных рассматриваемой тематике и вышедших в период с 1981 по 2017 год, проведен в обзорах [5–7].

Относительно заключений и выводов авторов [5–7] о рассмотренных ими публикациях, можно сделать некоторые обобщения.

1. Существенную роль в выбранных методических подходах к рассмотрению проблемы повышения эффективности генерации произведенных энергоносителей в западных странах сыграли существующие там условия: уровень развития и состав энергогенерирующих мощностей и потребителей энергии, площади занимаемых территорий, климатические особенности, хозяйственные связи между объектами генерации и объектами потребления, законодательные акты в области защиты окружающей среды от выбросов промышленных производств и т. п.

2. В работах западных исследователей рассмотрены, в основном, системы совместной генерации произведенных энергоносителей, относящиеся к малой энергетике, т. е., в соответствии с существующей классификацией, объекты генерации с общей установленной мощностью менее 30 МВт и единичной электрической мощностью агрегатов менее 10 МВт.

3. Авторы практически всех публикаций рассматривают развитие совместного произ-

водства энергоносителей (систем мультигенерации) как перспективное направление развития систем энергоснабжения, позволяющее уменьшить потребление топлива и, как следствие, выбросы CO₂ в атмосферу.

4. Определена тенденция развития совместной генерации произведенных энергоносителей от двух- и трехкомпонентной к технологии мультигенерации. При этом в качестве произведенных энергоносителей рассматриваются как традиционные электроэнергия, тепло и холод различных параметров, так и такие, как водород, кислород и т. п., а также и другие продукты, например, метанол и иные химические вещества, обладающие рыночным потенциалом.

5. Предлагается в дальнейших исследованиях расширять состав энергоносителей, которые могут быть использованы в мультигенерирующих системах как первичные, рассматривая существующие виды ископаемого топлива, возобновляемые источники энергии, а также различные сочетания и тех, и других.

6. Отмечается необходимость рассмотрения вопросов, связанных с аккумулярованием произведенных энергоносителей в связи с возможными дискретными режимами их генерации и потребления. Следует подчеркнуть, что идея совместного производства различных видов энергии тесно переплетается с проблемой аккумулярования энергии. Проблема весьма многогранная, один из ее аспектов – обеспечение постоянных условий работы электрогенерирующего оборудования, когда его эффективность, а также надежность отвечают наиболее высоким показателям. Так, например, предлагается, в часы провалов спроса на электроэнергию использовать ее избыток для получения водорода или сжатого воздуха, тем самым создавая запас энергии. Существуют и другие варианты решения этой проблемы. В такой постановке аккумулярование и совместное производство практически ничем не отличаются. Подчеркнем, что в принципе можно рассматривать аккумуляиро-

вание любого из производимых энергоносителей, например, тепла.

7. Эффективность совместного производства энергоносителей предлагается оценивать в сравнении с исходным вариантом, т.е. с раздельной их генерацией.

8. При оценке эффективности систем применялись различные термодинамические критерии (табл. 1). Нетрудно видеть, что различие между критериями, определяемыми на основе характеристик теплового баланса, (критерии 1–4 в табл. 1), весьма условно. Они связаны один с другим и вряд ли можно отдать предпочтение какому-то из них. Наряду с ними используется и такой критерий, как количество выбросов CO₂ в атмосферу. Разумеется, что этот критерий не может рассматриваться как вполне самостоятельный, поскольку он однозначно связан с экономией используемого ископаемого органического топлива. Его появление в числе кри-

териев, на наш взгляд, обусловлено тем исключительно внимательным отношением, которая проявляет западная общественность к проблеме глобального потепления.

Удивительно, но в анализируемых работах достаточно редко используется эксергетический метод (критерий 5), хотя показания к его использованию очевидны – произведенные энергоносители могут заметно отличаться по своей энергетической ценности. Попытка объяснить такую ситуацию предпринята автором [8]. По его мнению, сравнение показателей, основанных на энергии, с показателями с использованием эксергии, подчеркивает несоответствия, которые иногда возникают в реальности, скорее всего, из-за простоты использования понятия энергии, которая в конечном итоге в отличии от эксергии является «платной». Этим объясняется, почему энергетические показатели по-прежнему широко распространены.

Таблица 1

Термодинамические критерии оценки эффективности мультигенерационных систем

Thermodynamic criteria for evaluating the effectiveness of multigeneration systems

Критерий	Определение	Обозначение, примечание
1. Абсолютная экономия первичной энергии, $\Delta Q_{абс}$	$\Delta Q_{абс} = \sum_{i=1}^n Q_i - Q_{совм}$	Q_i – расход энергии при раздельном производстве i – го энергоносителя (продукта); $Q_{совм}$ – расход энергии при совместном производстве тех же энергоносителей и полезных продуктов
2. Относительная экономия первичной энергии, $\Delta q_{отн}$	$\Delta q_{отн} = \frac{\Delta Q_{абс}}{\sum_{i=1}^n Q_i}$	
3. Относительный критерий экономии топлива, ϑ	$\vartheta = \frac{\Delta Q_{абс}}{\sum_{i=1}^n Q_i}$	
4. Коэффициент использования тепла топлива, КИТТ	$КИТТ = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{Q_{топл}}$	N_i – энергия i – го произведенного энергоносителя; $Q_{топл}$ – энергия первичного топлива
5. Экологический критерий: относительное уменьшение выбросов CO ₂	$\Delta M_{CO_2} = \frac{M_{разд} - M_{совм}}{M_{разд}}$	M – выбросы при раздельном «разд» и совместном «совм» производстве энергоносителей
6. Эксергетический коэффициент энергосбережения, η_e	$\eta_e = \frac{E_{разд} - E_{совм}}{E_{разд}}$	E – эксергия при раздельном «разд» и совместном «совм» производстве энергоносителей

9. Наряду с термодинамическими используются и экономические показатели. При этом в различных публикациях эти показатели рассматриваются как для объектов генерации, так и для потребителей.

Отмечается, что экономическая оценка может относиться к операционным аспектам (например, для разработки оптимальных операционных стратегий для каждого продукта совмещенной генерации на основе соответствующих цен на энергоносители) или к аспектам планирования (например, для определения лучших технологий, размеров и топологий системы для минимизации общей стоимости или максимизации прибыли). Соответствующие индикаторы (критерии) необходимы для количественного определения эффективности различных операционных стратегий в разных условиях (с учетом определенной энергетической системы) или для определения наилучшего решения и ранжирования различных альтернатив на стадии проектирования. Тогда критерии оценки могут иметь детерминированный характер (когда предполагается, что соответствующие переменные известны с уверенностью или когда приведены средние значения из данного распределения) или вероятностный характер (когда дается хотя бы одна из переменных через стохастическую модель, которая может быть, например, основана на непрерывной или дискретной функции распределения вероятностей, а затем соответствующие результаты также могут быть даны с вероятностным описанием, из которых могут быть извлечены синтетические метрики, такие как средние значения).

10. В качестве методов оптимизации при проведении исследований использовались: линейное программирование, генетический алгоритм, метод лагранжевых множителей, метод ветвей и границ, разделение системы, эволюционный алгоритм, эволюционные алгоритмы линейного программирования, Парето-оптимизации (ценообразование в энергосистеме).

Одним из немногих реальных примеров воплощения идеи мультигенерация являются системы централизованного хладоснабжения. Следует отметить, что в странах Западной Европы и США централизованное хладоснабжение получило определенное распространение. Так, например, в работе [9] приводятся данные о холодильной мощности установок централизованного хладоснабжения, существовавших в Германии в конце 2005 года: общая установленная холодильная мощность составляла 700 МВт. При этом в год централизованно производилось около 600 ГВт·ч холода.

В отчете [10] приводятся материалы о существующей в Германии в г. Кемниц (Chemnitz) установке централизованного тепло – хладоснабжения. Потребителями холода являются магазины, офисные здания, оперный театр, технический университет. Общая установленная мощность оборудования потребителей составляет 10,6 МВт, в ближайшие несколько лет планируются новые присоединения с холодильной мощностью, примерно, 5–6 МВт.

Особенности эксплуатации объектов энергетики в условиях России

Переходя к анализу публикаций на тему совместной генерации произведенных энергоносителей в российской научно-технической литературе, необходимо, прежде всего, отметить существующие в России отличия организации энергетического хозяйства по сравнению с условиями в других странах. К ним относятся:

1. Значительное изменение температуры наружного воздуха в течение года, что определяет существенное различие в потребных электрической и тепловой мощностях (в первую очередь, тепловой) в отопительный и неотапительный периоды. Разница средних температур самого теплого и самого холодного месяца года даже на Европейской территории России в 1,5–2 раза превышает характерное значение этой разницы для стран Западной Европы.



2. Наличие развитой системы когенерации – производство тепла в сочетании с выработкой электроэнергии – на крупных ТЭЦ, централизованно обеспечивающих значительную часть потребности в этих энергоносителях в масштабах страны. Доля ТЭЦ в централизованной поставке тепла составляет 46 % и остается неизменной вот уже на протяжении последних 20 лет, хотя общее теплотребление за этот период снизилось на 18 % (1997 г. – 1519 млн Гкал, 2015 г. – 1251 млн Гкал).

3. Конструктивные особенности используемых на крупных ТЭЦ России паротурбинных установок, имеющих промышленные и теплофикационные отборы, что делает обязательным учет влияния любых внедряемых мероприятий, в том числе и связанных с совмещенной генерацией произведенных энергоносителей, на эффективность работы основного оборудования ТЭЦ. Это обуславливает необходимость системного подхода при определении эффективности использования технологий мультигенерации.

4. Большая территория страны с различной степенью населенности отдельных ее частей, что приводит к необходимости развития на различных территориях объектов как «большой», так и малой энергетики.

5. Исключительно низкий уровень использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для генерации электроэнергии и тепла по сравнению с существующими природными возможностями и мировыми показателями.

Эти отличия определили основные направления и методические подходы в российских научно-технических изданиях при рассмотрении вопросов повышения эффективности генерации произведенных энергоносителей путем их совмещенного производства.

Когенерация

Простейший случай реализации идеи совместного производства энергии различных, необходимых потребителю видов – это получившая широкое распространение не только в России, но и в мире когенерация, т.е. совмест-

ное производство электроэнергии и тепла. В «большой» энергетике объектами совместной генерации являются ТЭЦ с паротурбинными установками с единичной электрической мощностью более 10 МВт (при общей установленной мощности электростанции более 30 МВт) с турбоагрегатами теплофикационного типа, в малой энергетике – это либо газотурбинные установки (ГТУ), либо газопоршневые агрегаты (ГПА), либо паротурбинные установки малой (менее 10 МВт) установленной мощности в большинстве своём конденсационного типа или с противодавлением.

Сравнению эффективностей отдельной и совместной генерации электроэнергии и тепла в «большой» энергетике были посвящены исследования многих авторов. Основные усилия российских исследователей были направлены на определение эффективности совместного производства электроэнергии и тепла по сравнению с отдельным их производством. Однако различные энергетические организации в России при разработке соответствующих методик использовали различные подходы. Так, в [3] приводятся сведения о нескольких принципиально различных методах определения эффективности совместной выработки электроэнергии и теплоты [11–17]. Известны и сравнительно более ранние, например, [18], а также и более поздние [19, 20] публикации по этой тематике. Суть проблемы наиболее ясно изложена в [3]. Заключается она в том, что теплотехническое сообщество до сегодняшнего дня не может прийти к общему мнению о выборе единой методики определения эффективности комбинированной генерации электроэнергии и тепла. Речь идет о распределении затраченного на ТЭЦ топлива между использованным на производство электроэнергии и тепла. Существуют несколько разработанными различными организациями возможных вариантов расчета удельных показателей эффективности работы ТЭЦ, среди которых: балансовый «физический» метод, эксергетический метод, метод ОАО «Фирма ОРГРЭС», метод расчета удельных показателей по недовыработанной

электроэнергии, метод расчета, учитывающий тепловую ценность отборного пара. К ним можно добавить предложенный в [20] метод, основанный на использовании энергетической (тепловой) характеристики теплофикационной турбоустановки.

В [3] высказывается предположение о том, что преимущество совместной выработки электроэнергии и теплоты очевидно, однако все эти методы дают лишь различное толкование физической сущности рассматриваемого в них разделения затрат топлива на производство электроэнергии и тепла. В то же время, результаты расчетов по различным методикам бывают диаметрально противоположны.

Определенные трудности в оптимизации работы крупных ТЭЦ вызывают в последние годы организационные изменения в российской энергетике, суть которых определена в [21]: «В настоящее время теплофикация с комбинированным производством электроэнергии и тепла переживает в нашей стране серьезный кризис. Стоимость электроэнергии и тепла на многих ТЭЦ, особенно оснащенных устаревшим оборудованием, оказывается высокой, а их реализация по неразумно установленным тарифам – затрудненной. Положение усугубляется недостаточной надежностью теплосетей и значительными потерями тепла при передаче по ним. Многие потребители предпочитают строить собственные котельные и покупать электроэнергию других поставщиков. Причины такого положения носят двоякий технологический и институциональный (ценообразование, тарифы, налоги и т. д.) характер». К сожалению, за прошедшие почти пятнадцать лет со времени публикации работы [21] мало что изменилось, однако и на сегодняшний день, несмотря на рост теплоснабжения с использованием ТЭЦ малой мощности и отопительных котельных, централизованное теплоснабжение с производством тепла на крупных ТЭЦ в относительном измерении в России остается достаточно весомым. Как уже отмечалось, эта доля составляет около 46 %. Подчеркнем, что по этому показателю Россия

заметно уступает таким странам как Финляндия, Швеция, Дания, где его значение составляет 70 %, Польша и Германия (около 60 %).

Мультигенерация как способ выравнивания графиков нагрузки

Одной из серьезных проблем как, в основном, «большой», так и малой энергетики, является необходимость работы в резкопеременных режимах, которые определяются сезонной и суточной неравномерностями потребления энергии. Особенно остро эти проблемы присущи энергетике России из-за климатических особенностей страны. Так, говоря об электрической энергии, следует отметить снижение ее потребления, а, следовательно, и генерации, в летние месяцы года по сравнению с зимними месяцами, примерно в полтора раза, а также ночные, практически такие же «провалы» нагрузки. Потребление тепла летом уменьшается еще более значительно, что вызвано большой разницей температур наружного воздуха в зимние и летние месяцы практически на всей территории России. Например, если разница среднемесячной максимальной и минимальной температур в Берлине составляет 19,5 °С (январь – минус 0,9 °С, июль – +18,6 °С), то в Иркутске она составляет 37,1 °С (январь – минус 19,3 °С, июль – +17,8 °С). ТЭЦ отпускают в неотапительный период тепло только на горячее водоснабжение, что составляет около 10–20 % от генерации тепла в отопительный сезон. Такие изменения режимов потребления электроэнергии и тепла приводят к необходимости работы основного оборудования электростанций с нагрузками, значительно отличающимися от оптимальных, что вызывает ухудшение как термодинамических, так и экономических показателей работы основного оборудования, и соответствующее увеличение удельных расходов топлива на выработку электроэнергии. Так, по данным ПАО «Мосэнерго» удельные расходы топлива на выработку электроэнергии при работе теплофикационных агрегатов в неотапительный период больше, чем в отопительный, на 40–50 %.

В сложившихся условиях одним из наиболее эффективных способов повышения термодинамических и экономических показателей работы объектов «большой» и малой энергетики, может быть выравнивание годового и суточного графиков электрической, а на ТЭЦ – и тепловой, нагрузки. Этого можно добиться за счет генерации на них в периоды провалов нагрузки помимо электроэнергии, либо электроэнергии и тепла, различных произведенных энергоносителей, используемых либо сразу, либо позже в зависимости от потребности в этих энергоносителях. Таким образом электростанция может быть переведена в мультигенерационный режим работы. Таким энергоносителем может быть, например, холода, централизованно поставляемый потребителю в жаркие месяцы года, либо иной произведенный энергоноситель, например, водород, с его аккумулярованием и с организацией централизованной поставки этого энергоносителя потребителю по мере его востребованности. Выбор энергоносителя, который будет производиться для повышения технико-экономических показателей основного оборудования электростанции, зависит от возможности и целесообразности организации централизованного снабжения этим энергоносителем потребителей.

Необходимо отметить, что технология мультигенерации, при которой помимо электроэнергии и тепла на объекте генерации производится ещё и какой-либо другой энергоноситель, в «большой» энергетике России на сегодняшний день практического применения не нашла. Однако результаты уже проведенных исследований показывают, что преимущества, которые дает организация работы объектов «большой» энергетики в режиме мультигенерации, могут быть достаточно весомы.

За последние 10–15 лет в российской научно-технической периодической литературе вопросы, связанные с повышением энергетической эффективности различных типов тепловых электростанций, включая атомные,

за счет использования на них технологии мультигенерации, получили определенное развитие. Среди появившихся публикаций следует отметить серии статей, в которых приводятся результаты исследований, направленных на использование технологии мультигенерации для повышения эффективности работы электростанций в периоды провалов нагрузки, проведенных научными коллективами под руководством профессора Б.Г. Тувальбаева [22–29] и профессора Р.З. Аминова [30–39]. К такому же направлению может быть отнесена серия работ и других авторов [40–60], появившихся в это же время.

Сводка основных произведенных энергоносителей, рассмотренных в работах отечественных авторов по мультигенерации, представлена в табл. 2.

Так, в цикле работ [22–29], выполненных под руководством профессора Б.Г. Тувальбаева, обосновывается целесообразность комбинирования процесса выработки тепла и электрической энергии на ТЭС, постоянно работающей на номинальном режиме, с производством дополнительного энергоносителя либо технологического продукта на невостребованной диспетчерским графиком электроэнергии и тепле. Для этого предлагается создавать по сути мультигенерационные комплексы, в которых наряду с электроэнергией и теплом генерируются различные произведенные энергоносители, такие как водород [22, 23, 25, 26, 29], кислород [28], вторичное технологическое сырье [26], а также использовать городские ТЭЦ для сжигания городского мусора [24–27] и утилизации снеговых осадков с использованием низкопотенциальной сбросной тепловой энергии Городских ТЭЦ [25]. При этом основное оборудование ТЭС работает с номинальными электрической либо электрической и тепловой нагрузками, а невостребованные потребителями электрическая и тепловая мощности используются для генерации на установленном на ТЭС оборудовании для производства различных энергоносителей.

Таблица 2

Сводка основных произведенных энергоносителей в отечественных работах по мультигенерации

Summary of the main energy sources produced in domestic multi-generation works

Вид произведенного энергоносителя	Источники	Комментарий
1. Водород	[22, 23, 25, 26, 29, 37]	Дополнительное в периоды провала электрической нагрузки производство на ТЭС водорода, получаемого путем электролиза.
	[30, 31, 33, 34–36]	Исследованы особенности получения водорода на АЭС в периоды снижения нагрузки.
2. Кислород	[28]	Кислород получают как побочный продукт при электролизе воды для получения водорода. Его можно использовать в качестве добавки к дутьевому воздуху.
3. Холод	[39, 41–49]	Производство холода для систем централизованного хладоснабжения.
4. Метанол	[32]	Производство жидкого синтетического топлива.
5. Сжатый воздух	[38]	Аккумулирование дополнительно произведенного сжатого воздуха.
6. Дополнительные продукты, не являющиеся энергоносителями.	[24–27]	Расширение функциональных задач ТЭС

В работе [26] проведен подробный сравнительный анализ различных способов генерации водорода и показано, что для реализации предлагаемых решений в условиях мегаполисов электролизный способ производства водорода является более перспективным, чем с применением паровой конверсии.

В статье [26] приводятся также полученные авторами по результатам анализа годовых отчетов за 2009 год ОАО «Мосэнерго», ОАО «ОГК-3» и ОАО «ОГК-5» сведения о положительных эффектах, возникающих при реализации такого решения, которые приводят к существенной технической и экономической выгоде эксплуатации паротурбинного оборудования ТЭС, основными из которых являются:

1. Минимизация перерасхода топлива, обусловленного пусками и остановами энергоблоков ТЭС, работающих в режиме глубокого регулирования нагрузки энергосистемы. Согласно проведенной оценке в годовом исчислении топливные потери достигают значений 3,86 г/(кВт·ч) для ТЭЦ и 7,09 г/(кВт·ч) для КЭС.

2. Минимизация перерасхода топлива, обусловленного работой энергоблоков в режиме «горячего вращающегося резерва». При выделении отдельных ТЭС для глубокого регулирования нагрузки энергосистемы указанные потери достигают внушительных значений – 70,6 г/(кВт·ч) и более.

3. Уменьшение перерасхода топлива, обусловленное снижением экономичности ТЭС из-за работы на нерасчетном КПД при пониженной нагрузке или при перегрузке. При снижении нагрузки на 50 % потери могут достигать величины 39 г/(кВт·ч), эту величину в большинстве случаев удается снизить до 4–5 г/(кВт·ч) за счет работы энергоблока на режиме скользящего давления, однако последний вариант ведет к существенным дополнительным трудностям.

4. Снижение перерасхода топлива за счет ликвидации уменьшения экономичности оборудования вследствие накопления повреждений деталей и узлов энергетического оборудования, работающего в регулировочном режиме. Эти потери достигают величины 5,82 г/(кВт·ч) в годовом исчислении.

5. Системный эффект заметно увеличивается вследствие использования кислорода, полученного как побочного продукта, при производстве водорода, полученного из H_2O , с применением электролиза.

И хотя приведенные результаты расчетов повышения эффективности справедливо рассматриваются авторами как оценочные, они достаточно убедительно показывают хорошую перспективу практического развития данного направления в теплоэнергетике.

Приведенные в работе [28] расчеты для теплофикационного энергоблока Т-100 (с применением энергетических показателей ТЭЦ-20 «ТГК-3») при номинальном режиме работы (с выработкой водорода на неостребованной диспетчером электроэнергии при характерной диспетчерской нагрузке) показали, что общее среднегодовое снижение расхода условного топлива на выработку электроэнергии при осуществлении добавки произведенного на ТЭС слутного кислорода к дутьевому воздуху будет находиться на уровне 3,21 г/(кВт·ч) или 1,27 % и может увеличиться на 34–37 % при работе энергоблока по конденсационному циклу. В [28] были проведена также расчеты, которые показали, что при этом прямое снижение расхода электроэнергии и условного топлива на собственные нужды энергоблока Т-100-130 с пылеугольным котлоагрегатом Е-420-140Ж, реконструированным под сжигание природного газа, составит 705,8 тыс. кВт·ч/год и 178,2 т у.т./год соответственно.

В завершающей статье этого двенадцатилетнего (с 2006 по 2018 годы) цикла [29] авторами сделаны следующие выводы.

Во-первых, предлагаемые технологии совмещенного производства энергоносителей найдут в народном хозяйстве широкое применение (водородная энергетика, содовое производство); во-вторых – предлагаемые технологии позволят в связи со снижением удельных затрат топлива на генерацию энергоносителей

заметно и малозатратно улучшить экологию атмосферы и территорий.

В работе [29] высказана интересная мысль о принципиально ином подходе к определению мощности при проектировании ТЭС, если использовать на ней систему мультигенерации. Оптимальная величина установленной мощности основного энергогенерирующего оборудования ТЭС в этих условиях будет определяться возможностями поставки топлива, а при их достаточности – рациональным уровнем присоединенных энергоемких производств дополнительных произведенных энергоносителей. В концепции эксплуатации ТЭС с постоянной работой на номинальной нагрузке суммарный график нагрузок потребителей уже не будет являться определяющим обстоятельством для выбора мощности станции и её агрегатов. Заявляемое им энергопотребление априори будет обеспечено и по величине, и по длительности требуемых нагрузок. Мощность электростанции будет определяться также и требуемым энергопотреблением дополнительных энергоносителей, и необходимой производительностью присоединённых энергоёмких производств, использующих количество энергии, соответствующее разности суммарной номинальной мощности ТЭС и величины текущего, «по графику» её потребления. Очевидно, что это потребует нового подхода при выборе требуемого оборудования: его перечень и основные характеристики должны будут определяться на основе более широкого, чем чисто энергетический анализ.

Как одно из возможных направлений использования технологии мультигенерации можно рассматривать цикл работ, выполненных научной группой под руководством Р.З. Аминова в период с 2006 по 2018 г. [30–39]. Основными вопросами проведенных исследований являются различные аспекты использования произведенного на АЭС водорода для повышения эффективности работы электростанции.

Так, в работах [30, 31, 33, 39] рассмотрены различные вопросы использования на АЭС для повышения эффективности, надежности и безопасности ее работы установленного на электростанции водородно–энергетического комплекса, водород в котором генерируется методом электролиза за счет невостробованной в периоды «провалов» электрической нагрузки.

В то же время, имеются работы, в которых рассмотрены также и вопросы повышения эффективности ТЭС в основном за счет уменьшения удельных расходов топлива на выработку электроэнергии за счет перевода основного оборудования в близкие к номинальным режимам с использованием невостробованной потребителями электроэнергии и тепла для генерации произведенных энергоносителей, в том числе и водорода [34, 37]. В работах [30, 35, 37, 38] основное внимание уделено вопросам экономии топлива при использовании технологии совместного производства на электростанциях.

Следует также обратить внимание на патент на изобретение [32], в котором рассмотрено получение в качестве дополнительного произведенного энергоносителя на ТЭС метанола с последующим использованием его в качестве топлива для газовой турбины. Это техническое решение также реализует технологию мультигенерации.

Подчеркнем особую важность работ, выполненных для АЭС. Дело в том, что АЭС в России поставлены в тепличные условия. Они работают в базовой части нагрузки и практически никак не принимают участия в регулировании мощности. Значительную роль в преодолении сложностей, связанных с изменением нагрузки, играют тепловые станции, при этом разгружаются даже самые современные мощные блоки ПГУ. Использование водородного комплекса на АЭС дает возможность, не нарушая номинальный по нагрузке режим работы основного оборудования, привлечь АЭС к регулированию отпускаемой мощности в сеть.

Статья [40] носит теоретический характер и посвящена концептуальным вопросам исполь-

зования совместного производства различных энергоносителей на объектах генерации. Вывод, сделанный автором, практически однозначен – технические решения с совместным производством различных энергоносителей термодинамически технические решения, основанные на отдельной генерации тех же произведенных энергоносителей, и технологии мультигенерации имеют большое будущее.

Тригенерация

В работах [41–49] впервые предложены схемы тригенерации на базе парогазовых установок (ПГУ) теплофикационного (ПГУ-ТЭЦ) и конденсационного (ПГУ-КЭС) типов. В частности, в работе [49] проведено их сравнение с системами отдельной генерации и между собой. Для оценки эффективности были приняты эксергетический КПД и общепринятые экономические критерии. Анализ выполнялся с учетом повышения эффективности работы основного оборудования объектов генерации, определяемых обеспечением работы паротурбинных установок в оптимальных режимах. Результаты показывают, что использование технологии тригенерации в определенных режимах работы объектов «большой» энергетики является термодинамически более эффективной по сравнению с отдельной генерацией электроэнергии, тепла и холода.

На одну из разработанных схем установок авторами был получен патент на изобретение [46].

Необходимо подчеркнуть одно принципиальное отличие примененных в работах [41–49] методических подходов при определении эффективности использования систем совместной генерации произведенных энергоносителей на крупных ТЭЦ – это использование системного подхода. Эффективность совместной генерации в этом случае определяется не только с учетом преимуществ по сравнению с отдельной генерацией, но и с учетом повышения эффективности работы основного обо-

рудования объектов генерации, определяемых обеспечением работы паротурбинных установок в оптимальных режимах.

Результаты исследований различных вариантов установок тригенерации (совместное производство электроэнергии, тепла и холода) на объектах малой энергетики (ГТУ, ГПА) наиболее полно отражены в работах [51–57]. В них предлагается для генерации холода использовать термотрансформаторы, работающие либо в режиме холодильной машины, либо в совмещенном режиме, генерируя одновременно тепло и холод. Возможно применение различных типов термотрансформаторов, потребляющих либо электроэнергию (парокомпрессионные, воздушные), либо тепло (абсорбционные). Источники энергии для производства тепла и холода для различных типов энергоустановок представлены в табл. 3 [58].

Отличительной особенностью совместной генерации на объектах малой энергетики, изначально предназначенных для генерации электроэнергии, является применение в качестве первичного энергоносителя тепла выхлопных газов, обычно выбрасываемого в атмосферу. При генерации электроэнергии с применением ГТУ – это тепло уходящих газов, с применением ГПА – тепло уходящих газов и системы охлаждения установки. Утилизация этого высокотемпературного тепла дает до-

полнительную возможность для организации работы объекта малой энергетики в мультигенерационном режиме.

Другой пример перевода объектов малой энергетики в режим мультигенерации – надстройка паровых и отопительных котельных электрогенерирующим установками.

Оба варианта стали предметом исследований, результаты которых приведены в российской научно-технической литературе. Так работы [50–51] посвящены надстройке котельных электрогенерирующими установками, в статье [52], так же, как и в отчете о НИР [53], рассматриваются возможности совместной генерации электроэнергии, тепла и холода на объектах малой энергетики, разработаны новые, более совершенные схемы, а также методические материалы, позволяющие научно обоснованно определять эффективность работы установок, одновременно производящих либо два (технология когенерации), либо три (технология тригенерации) вида энергии.

Как подтверждение актуальности рассматриваемого в работе направления, в последние годы появились защищенные патентами разработки [54–56], в которых предложены новые технические решения, направленные на повышение эффективности и надежности объектов малой энергетики при их работе в режимах когенерации и тригенерации.

Таблица 3

Источники энергии для производства тепла и холода для различных типов энергоустановок

Energy sources for heat and cold production for various types of power plants

Тип генерирующей установки	Источник энергии, используемой для производства	
	тепла	холода
ПТУ	Отбор теплофикационной турбины	Отбор теплофикационной турбины Электроэнергия
ГТУ, ГПА	Тепло уходящих газов	Тепло уходящих газов Электроэнергия
ПГУ	Отбор теплофикационной турбины Тепло уходящих газов	Отбор пара в ПТУ части Тепло газа на выхлопе ГТУ части Электроэнергия

Появились первые сообщения об опыте эксплуатации тригенерационных установок малой энергетики. Например, в [57] приводятся сведения об энергоцентре, служащем для снабжения торгового комплекса общей площадью около 100 тыс. м². В энергоцентре установлены когерентные модули, представляющие собой автономно действующую блочную теплоэлектростанцию (БТЭС). Производство электроэнергии осуществляется генераторами с приводом от газопоршневых агрегатов, использующих в качестве топлива природный газ. Тепло в БТЭС вырабатывается в результате утилизации отводимого от ГПА тепла (из системы охлаждения) и тепла уходящих газов. В энергоцентре установлены четыре модуля, максимальная мощность каждого из которых составляет: по электрической энергии – 1,5 МВт, по тепловой – 1,03 МВт. Суммарный коэффициент полезного действия (или коэффициент использования тепла топлива – КИТТ) этих энергоустановок достигает 82 %. Для обеспечения пиковых тепловых нагрузок в холодное время года дополнительно используются два водогрейных котла мощностью 3,85 МВт каждый. В летний период вырабатываемое тепло используется для работы двух холодильных машин абсорбционного типа (производительность по холоду 1,6 МВт), обеспечивающих функционирование систем кондиционирования торгового комплекса. При эксплуатации установки принципиально возможны как раздельная, так и одновременная генерация тепла и холода.

Анализ публикаций российских исследователей, посвященных вопросам эксплуатации когенерационных и тригенерационных установок малой энергетики, показывает высокую термодинамическую и технико-экономическую эффективность этих устройств. Отличительной чертой российских публикаций является применение в качестве критерия оценки эффективности эксергетического КПД. Активно используемый западными учеными критерий, оценивающий снижение выбросов CO₂ в

окружающую среду, в российских исследованиях практически не применяется.

Интересным представляется направление, использующее для генерации ряда произведенных энергоносителей т.н. бестопливные установки на базе детандер-генераторного агрегата (ДГА) и термотрансформаторов парокompрессионного либо абсорбционного типов [58–76]. В его основе лежит использование избыточного для технологического применения на энергоустановке давления газа, поступающего по магистральному трубопроводу. Чаще всего это давление бесполезно теряется при дросселировании, установка ДГА позволяет получить бесплатный для потребителя газа дополнительный источник энергии. Результатом исследований стало как развитие общетеоретических вопросов использования ДГА в системе газоснабжения [58, 60, 66–71], так и разработанные схемы различных по своей сути мультигенерирующих установок для совместной генерации как электроэнергии и холода (например, [59, 62–64, 72–76]), так и электроэнергии, холода и тепла (например, [58]).

Заключение

1. Термодинамическая и экономическая эффективности систем, реализующих технологию мультигенерации при правильных схемных решениях и выполнении необходимых условий в большинстве случаев оказываются выше, чем при раздельной их генерации. В то же время, исследования в области повышения эффективности энергоснабжения за счет использования систем мультигенерации нельзя полагать завершенными, и они должны быть продолжены как в области развития научно-методической базы, так и при натурных экспериментах на действующих установках.

2. Научно-методическая база систем мультигенерации требует развития в следующих направлениях:

2.1. Необходим дальнейший анализ предлагаемых в различных публикациях критериев и методик оценки эффективности систем мульт-



тигенерации с разработкой рекомендаций по их применению. Это, в частности, предполагает:

проведение исследований с целью обоснования методики определения эффективности организации централизованного снабжения произведенными энергоносителями, рассматривая объект генерации отдельно, потребителей – отдельно, либо как образующих единый комплекс;

рассмотрение ситуаций, когда производятся такие энергоносители, как один из продуктов разделения воздуха азот, углекислота в различных формах и т. п., которые не предполагаются к применению в дальнейшем как источник энергии. Необходимо определить, насколько оправдано в этих случаях использование термодинамических критериев, какие экономические показатели должны применяться;

определение эффективности мультигенерирующих систем при использовании в них в качестве первичных энергоносителей возобновляемых источников энергии как самостоятельно, так и сочетаниях с различными традиционными видами топлива.

2.2. Использование технологии мультигенерации предполагает коррекцию постановки типичной задачи о достижении наибольшей эффективности при обеспечении потребителя необходимыми ему энергоносителями.

Исходными данными являются:

заданные количественно и качественно необходимые объемы произведенных энергоносителей всех видов для потребителей какого-либо района;

состав основного оборудования объектов генерации, которые могут использоваться для снабжения потребителей электроэнергией и теплом.

Должны быть получены ответы на два вопроса:

1) Какие объемы электроэнергии и тепла могут быть в периоды «провалов» электрической и тепловой нагрузки использованы для производства различного рода произведенных энергоносителей (сжатый воздух, водород,

продукты разделения воздуха, сжиженный газ, углекислота в различных агрегатных состояниях и т. п.), либо аккумулированы для последующего применения?

2) Как с наибольшей эффективностью использовать имеющиеся в периоды «провалов» нагрузки резервы электроэнергии и тепла, тем самым обеспечивая работу основного оборудования в оптимальных либо близких к ним режимах?

При такой постановке задачи:

определяются возможные объемы и параметры произведенных основным оборудованием электроэнергии и тепла, которые в периоды снижения потребности в них могут быть произведены и использованы в качестве первичной энергии для генерации (с применением необходимых для этого дополнительно установленных на объекте генерации агрегатов) каждого из возможного спектра произведенных энергоносителей;

определяется возможный состав произведенных энергоносителей, соответствующий требованиям промышленности и социальных структур;

определяются возможные повышения термодинамической эффективности работы основного оборудования объекта генерации, обусловленные генерацией электроэнергии и тепла при работе основного оборудования в оптимальных режимах;

определяются термодинамические и экономические показатели генерации различных произведенных энергоносителей с использованием дополнительно произведенных электроэнергии и тепла, проводится сравнительный анализ этих показателей, а также их сравнение с такими же показателями при аккумулировании дополнительно выработанных объемов электроэнергии и тепла.

При такой постановке задачи получаемый эффект в явном виде определяется двумя факторами – с одной стороны, более высокой эффективностью совместной генерации произведен-

ных энергоносителей по сравнению с раздельной, с другой, повышением термодинамических и экономических показателей работы основного оборудования объекта генерации. Такая, основанная на системном подходе методика, позволяет более глубоко и разносторонне анализировать мультигенерирующие системы, качественно повысить результаты исследований.

3. Одним из перспективных направлений повышения как минимум термодинамической эффективности систем мультигенерации в России может стать использование для получения первичной энергии для этих систем технологических перепадов давления транспортируемого природного газа в системах газоснабжения, особенно при применении для этих целей установок бесплощивной генерации энергии различных видов.

4. Результаты проведенных исследований позволяют надеяться на дальнейшее развитие мультигенерирующих систем, внедрение которых позволит добиться повышения эффективности энергоснабжения и связанных с ним сокращения расходов невозобновляемых энергоресурсов страны и снижения вредных выбросов в окружающую среду.

Государственное задание в рамках конкурсного отбора научных проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и научных лабораторий организаций высшего образования (№ 13.3233.2017/ПЧ). Совет по грантам Президента РФ в рамках получения стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам по научному проекту № СП-1141.2018.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети. 7-е изд., стереот. М.: Изд. дом МЭИ, 2001.
- [2] **Буров В.Д., Дорохов Е.В., Елизаров Д.П. [и др.]**. Тепловые электрические станции / под ред. М.В. Лавыгина, А.С. Седлова, С.В. Цанева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. дом МЭИ, 2007.
- [3] **Киселев Г.П.** Варианты расчета удельных показателей эффективности работы ТЭЦ: метод. пособие. М.: Изд. дом МЭИ, 2003. 32 с.
- [4] **Кокорин О.Я.** Преимущества автономных станций для совместной выработки электроэнергии, тепла и холода // Холодильная техника. 2003. № 12.
- [5] **Chicco G., Mancarella P.** Distributed multi-generation: A comprehensive view // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. No. 13. P. 535–551.
- [6] **Mancarella P.** MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models // *Energy*. 2014. No. 65. P. 1–17.
- [7] **Jana K., Ray A., Majoumerd M.M., Assadi M., De S.** Polygeneration as a future sustainable energy solution – A comprehensive review // *Applied Energy*. 2017. No. 202. P. 88–111.
- [8] **Nesheim S.J., Ertesvag I.S.** Efficiencies and indicators defined to promote combined heat and power // *Energy Conversion and Management*. 2007. No. 48. P. 1004–1015.
- [9] **Miller J.** Kälte aus Fernwärme im Aufwind. Blickpunkt // *AGFW aktuell*. 2005. No. 09.
- [10] **Göppert S., Urbaneck T.** Machbarkeitsuntersuchung zur Stärkung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung durch den Einsatz von Kältespeichern in großen Versorgungssystemen, Stadtwerke Chemnitz AG, Bereich Netze, Abteilung Fernwärme/Fernkälte. 2006.
- [11] **Соколов Е.Я.** О способах распределения расходов топлива на ТЭЦ // *Теплоэнергетика*. 1992. № 9. С. 55–59.
- [12] **Пустовалов Ю.В.** К дискуссии о методах распределения затрат на ТЭЦ // *Теплоэнергетика*. 1992. № 9. С. 48–55.
- [13] Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. РД 34.08.552-95. СПО ОРГРЭС. М., 1995.
- [14] **Рыжкин В.Я.** Тепловые электрические станции. 2-е изд. М.: Энергия, 1976.
- [15] **Андрющенко А.И., Аминов Р.З., Хлебалин Ю.М.** Теплофикационные установки и их использование. М.: Высш. шк. 1989.
- [16] **Дьяков А.Ф., Савин В.И., Киселев Г.П.** О необходимости перехода на эксергетический метод распределения расхода топлива и затрат на ТЭЦ // *Известия академии наук. Энергетика*. 1994. № 3. С. 3–8.
- [17] **Бродянский В.М.** Обобщенные показатели в энергетике // *Теплоэнергетика*. 1989. № 2. С. 63–66.

- [18] **Калафати Д.Д.** Отопительный коэффициент как показатель эффективности различных способов теплоснабжения // Известия вузов. Энергетика. 1984. № 2. С. 72–77.
- [19] **Охотин В.С.** Сравнительный термодинамический анализ различных схем теплоснабжения по удельному расходу топлива // Вестник МЭИ. 2011. № 1. С. 14–20.
- [20] **Охотин В.С., Архипова И.М.** Оценка распределения затрат топлива между электроэнергией и теплотой на паротурбинных ТЭЦ // Новое в российской электроэнергетике. 2013. № 3. С. 5–14.
- [21] **Ольховский Г.Г.** Совершенствование технологий комбинированной выработки электроэнергии и тепла на ТЭЦ России // Новости теплоснабжения. 2003. № 10.
- [22] **Тувальбаев Б.Г.** Перспективные схемно-конструкторские системы традиционных ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2008. № 6. С. 2–4.
- [23] **Тувальбаев Б.Г.** Отдаленные перспективы использования ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 4 (66). С. 2–5.
- [24] **Тувальбаев Б.Г., Верес А.А., Моисеев В.И., Скопцов Ю.В.** Расширение функциональных задач оборудования городских ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2011. № 2 (70). С. 37–38.
- [25] **Тувальбаев Б.Г., Моисеев В.И., Куличихин В.В.** Городская ТЭЦ – новая структурная производственно-генерирующая составляющая городского энергетического хозяйства // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. № 2 (76). С. 2–7.
- [26] **Тувальбаев Б.Г., Моисеев В.И.** Работа ТЭС в постоянном режиме с выработкой дополнительной продукции на невостребованной энергии // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 4 (84). С. 24–27.
- [27] **Тувальбаев Б.Г., Моисеев В.И.** Утилизация снего-ледовой массы – одна из перспективных муниципальных задач, решаемых городской ТЭЦ // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 1 (87). С. 8–13.
- [28] **Тувальбаев Б.Г., Моисеев В.И.** Использование кислорода спутной выработки дополнительного производства в технологическом процессе ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 4 (90). С. 40–43.
- [29] **Тувальбаев Б.Г., Марченко М.Е., Марченко Е.М., Валитов Д.Ш.** Концептуальные направления развития теплоэнергетики // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 3 (107). С. 3–9.
- [30] **Аминов Р.З., Крылов М.К., Байрамов А.Н.** Пути экономии органического топлива при использовании водородных технологий на АЭС // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса. 2006. № 4. С. 56.
- [31] **Аминов Р.З., Байрамов А.Н.** Эффективность производства водорода на основе современных технологий // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2009. № 1. С. 128–137.
- [32] **Батенин В.М., Аминов Р.З., Масленников В.М., Шкрет А.Ф., Гариевский М.В., Никулин А.Н.** Комбинированный способ производства электроэнергии и жидко-синтетического топлива в составе парогазовой установки. Пат. 2356877 Российская Федерация, МПК: С 07 С 27 12, С 07 С 31 04, F 02 С 1 00. № 2007123840/15. Дата регистрации: 25.06.2007.
- [33] **Аминов Р.З., Байрамов А.Н.** Системная эффективность водородных циклов на основе внепиковой электроэнергии АЭС // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2011. № 4. С. 51–52.
- [34] **Аминов Р.З., Пронь Д.М.** Обеспечение прохождения периода ночного минимума электропотребления ОЭС Центра с учетом ввода мощностей АЭС // Электрические станции. 2013. № 6 (983). С. 36–39.
- [35] **Аминов Р.З., Байрамов А.Н.** Оценка конкурентной эффективности получения водорода методом электролиза воды на основе внепиковой электроэнергии // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 4. С. 84–90.
- [36] **Аминов Р.З., Байрамов А.Н.** Оценка эффективности получения водорода на базе внепиковой электроэнергии АЭС // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2015. № 5–6 (193–194). С. 59–70.
- [37] **Аминов Р.З., Шкрет А.Ф., Гариевский М.В.** Оценка ресурсных и экономических показателей работы паротурбинных блоков ТЭС при переменных режимах // Теплоэнергетика. 2016. № 8. С. 25–31.
- [38] **Аминов Р.З., Новичков С.В.** Модификация схем ГТУ в установках воздушного аккумулирования // Труды Академэнерго. 2017. № 2. С. 84–92.
- [39] **Аминов Р.З., Новичков С.В.** Использование абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины для повышения эффективности работы воздушно-аккумулирующей газотурбинной электро-

станции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 11–12. С. 62–72.

[40] **Очков В.Ф.** Сохранение и развитие тепловых электростанций, или n-генерация // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 1 (105). С. 50–61.

[41] **Агабабов В.С., Смирнова У.И., Тидеман П.А.** Разработка схем высокоэффективных парогазовых ТЭС с системой одновременного производства тепла и холода // Новое в российской электроэнергетике. Ежемесячный электронный журнал. 2013. № 8. С. 16–25.

[42] **Агабабов В.С., Тидеман П.А.** Исследование эффективности ПГУ теплофикационного типа с системой одновременного производства тепла и холода // Повышение эффективности энергетического оборудования – 2013: сб. докл. VIII ежегодной Международ. науч.-практ. конф. ФБГОУ ВПО «НИУ МЭИ». М., 2013. С. 305–312.

[43] Разработка и исследование схем высокоэффективных парогазовых ТЭС с системой одновременного производства тепла и холода с использованием низкопотенциальной теплоты: отчет о НИР / А.В. Клименко. М.: ВТИ, 2013. 273 с.

[44] **Клименко А.В., Агабабов В.С., Рогова А.А., Тидеман П.А.** Схемы ПГУ-КЭС и ПГУ-ТЭЦ с системами одновременного совмещенного производства тепла и холода // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 1 (87). С. 20–23.

[45] **Клименко А.В., Агабабов В.С., Рожнатовский В.Д., Байдакова Ю.О., Рогова А.А., Тидеман П.А.** Оценка технико-экономической эффективности тригенерации в парогазовой установке с парокompрессионным тепловым насосом // Новое в российской электроэнергетике: [электрон. журнал]. 2013. № 12. С. 5–14.

[46] **Клименко А.В., Агабабов В.С., Байдакова Ю.О., Рогова А.А., Смирнова У.И., Тидеман П.А.** Тригенерационная установка с использованием парогазового цикла для производства электроэнергии и парокompрессионного теплонасосного цикла для производства тепла и холода. Пат. 2530971 Российская Федерация, МПК F01K23/06; заявитель и патентообладатель ОАО «ВТИ». № 2013137038/06; заявл. 08.08.2013; опубл. 20.10.2014, Бюл. № 29. 7 с.

[47] **Агабабов В.С., Сухих А.А., Кузнецов К.И., Рогова А.А., Коршикова А.А.** Экспериментальные исследования режимов работы теплонасосной установки при совместной выработке теплоты и холода

// Новое в российской электроэнергетике: [электрон. журнал]. 2012. № 9. С. 26–38.

[48] **Клименко А.В., Агабабов В.С., Байдакова Н.О., Байдакова Ю.О., Олейникова Е.Н., Тидеман П.А.** Влияние температуры наружного воздуха на термодинамическую эффективность ПГУ с установкой для одновременной генерации тепла и холода // Новое в российской электроэнергетике: [электрон. журнал]. 2013. № 10. С. 5–19.

[49] **Клименко А.В., Агабабов В.С., Рогова А.А., Тидеман П.А.** Особенности комбинированного производства электроэнергии, тепла и холода на базе парогазовой установки // Теплоэнергетика. 2015. № 3. С. 11–15.

[50] **Лапир М.А., Батенин В.М., Масленников В.М., Цой А.Д.** Экологически чистые энергогенерирующие комплексы на базе газотурбинных надстроек водогрейных котлов // Новости теплоснабжения. 2002. № 1 (17). С. 41–46.

[51] **Кузнецов С.В.** Надстройка котельных газотурбинными установками // Новости теплоснабжения. 2001. № 10 (14). С. 36–37.

[52] **Карасевич А.М., Сеннова Е.В., Федяев А.В., Федяева О.Н.** Эффективность развития малых ТЭС на базе газотурбинных и дизельных энергоустановок при газификации регионов // Теплоэнергетика. 2000. № 12.

[53] Определение перспективных направлений и разработка технических решений, направленных на повышение термодинамических и технико-экономических эффективностей объектов распределенной и малой энергетики за счет использования технологии тригенерации: отчет о НИР / А.В. Клименко. М.: НИУ «МЭИ». 2014. 273 с.

[54] **Агабабов В.С., Архарова А.Ю., Малафеева Н.В.** Установка для получения электроэнергии, теплоты и холода. Пат. 46565 Российская Федерация, МПК F 01 K F 25 B 11/02, F 01 K 27/00/; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «МЭИ (ТУ)». № 46565/2005; заявл. 24.03.2004; опубл. 10.07.2005, Бюл. № 16.

[55] **Гайсин Ф.А., Манташов А.Т.** Тригенерационная газотурбинная установка. Пат. 2369808 Российская Федерация, F 25 B 11/00; заявитель и патентообладатель ООО «Авиадвигатель». № 2369808/2009; заявл. 26.11.2007; опубл. 10.10.2009, Бюл. № 28. 5 с.

[56] **Баженов А.И., Михеева Е.В., Хлебалин Ю.М.** Способ комбинированного производства

электроэнергии, тепла и холода. Пат. 2457352 Российская Федерация, F 02 G 5/00/ заявитель и патентообладатель Саратов. ГБОУВПО СГТУ. № 2399781/2010; заявл. 21.12.2010; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 24. 3 с.

[57] **Кузнецов С.В.** Опыт применения поршневых двигателей для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии редакция «НТ». URL: <http://www.combienergy.ru/stat/83-Opyt-primeneniya-porshnevyyh-dvigatelye-dlya-kombinirovannoy>

[58] **Клименко А.В., Агабабов В.С., Ильина И.П., Рожнатовский В.Д., Бурмакина А.В.** Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 36–43.

[59] **Агабабов В.С., Корягин А.В., Джураева Е.В.** Производство электроэнергии в детандер-генераторных агрегатах с одновременным отпуском теплоты различных температурных уровней (теплоты и холода) // Рациональное использование природного газа в металлургии: сб. тез. Междунар. науч.-практич. конф. (Москва, 13–14 ноября 2003 г.). М.: МИСИС. 2003.

[60] Выбор методов определения энергетической и технико-экономической эффективности, термодинамический анализ процессов в установках для производства электроэнергии, теплоты и холода на базе детандер-генераторных агрегатов и возобновляемых источников энергии: отчет о НИР / В.С. Агабабов. М.: ООО «Интехэнерго-инжиниринг», 2007. 235 с.

[61] **Агабабов В.С.** Способ работы детандерной установки и устройство для его осуществления: пат. 2150641 Российская Федерация 7 F 25 B 11/02, F 01 K 27/00/; заявитель и патентообладатель Московский энергетический институт (ТУ). №2150641; заявл. 15.06.1999; опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16.

[62] **Агабабов В.С., Джураева Е.В., Архарова А.Ю.** Установка для производства электроэнергии на базе ДГА, воздушных турбины и компрессора // Вестник МЭИ. 2007. № 2. С. 48–53.

[63] **Мишнер Й., Агабабов В.С., Джураева Е.В., Соловьева Е.С., Каменский С.В.** Бестопливная энергетическая установка, включающая в себя детандер-генераторный агрегат, воздушный компрессор и воздушную турбину // Энергосбережение и водоподготовка. 2007. № 6. С. 61–63.

[64] **Агабабов В.С., Уклучев О.Ю.** Бестопливная установка для производства электроэнергии и теп-

лоты // Энергосбережение и водоподготовка. 2008. № 6. С. 36–39.

[65] **Агабабов В.С., Смирнова У.И., Колосов А.М.** Оценка эффективности работы бестопливных энергогенерирующих установок для производства электроэнергии в системе газоснабжения // Вестник МЭИ. 2010. № 2. С. 15–20.

[66] **Агабабов В.С., Корягин А.В.** Бестопливные детандер-генераторные установки. М.: Изд. дом МЭИ, 2011. 63 с.

[67] **Агабабов В.С., Байдакова Ю.О., Костюченко П.А.** Анализ влияния параметров работы бестопливной энергогенерирующей установки на ее эффективность // Энергосбережение и водоподготовка. 2011. № 1. С. 71–73.

[68] **Агабабов В.С., Байдакова Ю.О.** Математическое описание схем бестопливных установок генерации электроэнергии на базе одно- и двухступенчатых детандер-генераторных агрегатов и теплонасосных установок парокompрессионного и воздушного типов // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 1 (81). С. 39–42.

[69] **Агабабов В.С., Байдакова Ю.О., Тимошенко Н.И.** Оценка показателей эффективности инвестиций в строительство бестопливных установок генерации электроэнергии на базе детандер-генераторных агрегатов и теплонасосных установок парокompрессионного и воздушного типов // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 3 (83). С. 63–65.

[70] **Рогова А.А.** Перспективы развития бестопливных тригенерационных технологий // Энергия. 2013: матер. VIII Междунар. науч.-технич. конф. Иваново. 2013. С. 186–187.

[71] **Агабабов В.С., Байдакова Ю.О.** Оценка термодинамической и экономической эффективности установок бестопливной генерации электроэнергии на основе одно- и двухступенчатых детандер-генераторных агрегатов и парокompрессионных тепловых насосов // Известия академии наук. Энергетика. 2014. № 4. С. 50–54.

[72] **Клименко А.В., Агабабов В.С., Корягин А.В., Байдакова Ю.О.** Генерация холода с применением детандер-генераторных агрегатов // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 37–44.

[73] **Агабабов В.С., Петин С.Н., Борисова П.Н.** Термодинамический анализ схемы бестопливной установки для одновременной генерации электро-

энергии и холода // Энергосбережение и водоподготовка. 2016. № 4 (102). С. 39–45.

[74] **Агабабов В.С., Борисова П.Н.** Схема установки для бестопливной генерации электроэнергии и холода // Новое в российской электроэнергетике. Ежемесячный электронный журнал. 2016. № 8. С. 29–37.

[75] **Агабабов В.С., Борисова П.Н., Петин С.Н.** Термодинамический анализ установки для одно-

временной генерации электроэнергии и холода двух температурных потенциалов // Новое в российской электроэнергетике: [электрон. журнал]. 2017. № 4. С. 37–47.

[76] **Клименко А.В., Агабабов В.С., Борисова П.Н.** Возможность производства холода и дополнительной электроэнергии на тепловой электростанции // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 30–37.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КЛИМЕНКО Александр Викторович — доктор технических наук главный научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ»

E-mail: klimenkoav@bk.ru

АГАБАБОВ Владимир Сергеевич — доктор технических наук профессор Национального исследовательского университета «МЭИ»

E-mail: agababovvs@yandex.ru

БОРИСОВА Полина Николаевна — инженер Национального исследовательского университета «МЭИ».

E-mail: borisovapn@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 13.05.2019

REFERENCES

[1] **Ye.Ya. Sokolov**, Teplofikatsiya i teplovyye seti [District heating and heating networks]. 7-ye izd., stereot. M.: Izdatelstvo MEI, 2001.

[2] **V.D. Burov, Ye.V. Dorokhov, D.P. Yelizarov [i dr.]**, Teplovyye elektricheskiye stantsii [Thermal power plants]. Pod red. M.V. Lavygina, A.S. Sedlova, S.V. Tsaneva. 2-ye izd., pererab. i dop. M.: Izdatelskiy dom MEI, 2007.

[3] **G.P. Kiselev**, Varianty rascheta udelnykh pokazateley effektivnosti raboty TETs: Metodicheskoye posobiye [Variants of calculation of specific indicators of efficiency of the CHP: a Methodological guide]. M.: Izdatelstvo MEI, 2003.

[4] **O.Ya. Kokorin**, Preimushchestva avtonomnykh stantsiy dlya sovmestnoy vyrabotki elektroenergii, tepla i kholoda [Advantages of stand-alone plants for combined generation of electricity, heat and cold], Kholodilnaya tekhnika, 12 (2003).

[5] **G. Chicco, P. Mancarella**, Distributed multi-generation: A comprehensive view, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (2009) 535–551.

[6] **P. Mancarella**, MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models, Energy. 65 (2014) 1–17.

[7] **K. Jana, A. Ray, M.M. Majoumerd, M. Assadi, S. De**, Polygeneration as a future sustainable energy solution – A comprehensive review, Applied Energy, 202 (2017). 88–111.

[8] **S.J. Nesheim, I. S. Ertesvag**, Efficiencies and indicators defined to promote combined heat and power, Energy Conversion and Management, 48 (2007) 1004–1015.

[9] **J. Miller**, Kälte aus Fernwärme im Aufwind. Blickpunkt, AGFW aktuell. 09 (2005).

[10] **S. Göppert, T. Urbaneck**, Machbarkeitsuntersuchung zur Stärkung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung durch den Einsatz von Kältespeichern in großen Versorgungssystemen, Stadtwerke Chemnitz AG, Bereich Netze, Abteilung Fernwärme/Fernkälte. 2006.

[11] **Ye.Ya. Sokolov**, O sposobakh raspredeleniya raskhodov topliva na TETs [On the methods of allocation of costs of fuels for power plants], Teploenergetika, 9 (1992) 55–59

[12] **Pustovalov Yu.V.** K diskussii o metodakh raspredeleniya zatrat na TETs [To the discussion on the methods of cost allocation for CHPP], Teploenergetika, 9 (1992) 48–55



- [13] Metodicheskiye ukazaniya po sostavleniyu otcheta elektrostantsii i aktsionernogo obshchestva energetiki i elektrifikatsii o teplovy ekonomichnosti oborudovaniya. RD 34.08.552-95.SPO ORGRES. Moskva, 1995.
- [14] **V.Ya. Ryzhkin**, Teplovyye elektricheskiye stantsii [Thermal power plants]. 2-ye izd. M.: Energiya, 1976.
- [15] **A.I. Andryushchenko, R.Z. Aminov, Yu.M. Khlebalin**, Teplofikatsionnyye ustanovki i ikh ispolzovaniye . [Cogeneration plants and their use]. M.: Vyssh. shk. 1989
- [16] **A.F. Dyakov, V.I. Savin, G.P. Kiselev**, O neobkhodimosti perekhoda na eksergeticheskiy metod raspredeleniya raskhoda topliva i zatrat na TETs [About need of transition to the exergy method of distribution of fuel consumption and expenses on CHPP], Izvestiya akademii nauk. Energetika, 3 (1994) 3–8.
- [17] **V.M. Brodyanskiy**, Obobshchennyye pokazateli v energetike [Generalized indicators in the energy sector], Teploenergetika, 2 (1989) 63–66
- [18] **D.D. Kalafati**, Otopitelnyy koeffitsiyent kak pokazatel effektivnosti razlichnykh sposobov teplosnabzheniya [Heating coefficient as an indicator of the efficiency of different methods of heat supply], Izvestiya vuzov. Energetika, 2 (1984) 72–77
- [19] **V.S. Okhotin**, Sravnitelnyy termodinamicheskiy analiz razlichnykh skhem teplosnabzheniya po udelnomu raskhodu topliva [Comparative thermodynamic analysis of different heat supply schemes by specific fuel consumption], Vestnik MEI, 1 (2011) 14–20
- [20] **V.S. Okhotin, I.M. Arkhipova**, Otsenka raspredeleniya zatrat topliva mezhdru elektroenergiyey i teplotoy na paroturbinnnykh TETs [Evaluation of fuel cost distribution between electricity and heat at steam turbine CHPP], Novoye v rossiyskoy elektroenergetike, 3 (2013) 5–14.
- [21] **G.G. Olkhovskiy**, Sovershenstvovaniye tekhnologii kombinirovannoy vyrabotki elektroenergii i tepla na TETs Rossii [Improvement of combined heat and power generation technologies at the Russian thermal power plant], Novosti teplosnabzheniya, 10 (2003).
- [22] **B.G. Tuvalbayev**, Perspektivnyye skhemno-konstruktorskiye sistemy traditsionnykh TES [Prospective circuit-design system traditional thermal power plants], Energoberezheniye i vodopodgotovka, 6 (2008) 2–4.
- [23] **B.G. Tuvalbayev**, Otdalennyye perspektivy ispolzovaniya TES [Long-term prospects for the use of thermal power plants], Energoberezheniye i vodopodgotovka, 4 (66) (2010) 2–5.
- [24] **B.G. Tuvalbayev, A.A. Veres, V.I. Moiseyev, Yu.V. Skoptsov**, Rasshireniye funktsionalnykh zadach oborudovaniya gorodskikh TES [Expansion of functional tasks of urban CHP equipment], Energoberezheniye i vodopodgotovka, 2 (70) (2011) 37–38.
- [25] **B.G. Tuvalbayev, V.I. Moiseyev, V.V. Kulichikhin**, Gorodskaya TETs – novaya strukturnaya proizvodstvenno-generiruyushchaya sostavlyayushchaya gorodskogo energeticheskogo khozyaystva [Urban CHP – a new structural production and generation component of the urban energy sector], Energoberezheniye i vodopodgotovka, 2 (76) (2012) 2–7.
- [26] **B.G. Tuvalbayev, V.I. Moiseyev**, Rabota TES v postoyannom rezhime s vyrabotkoy dopolnitelnoy produktsii na nevostrebovannoy energii [Operation of TPP in a constant mode with the production of additional products on unclaimed energy], Energoberezheniye i vodopodgotovka, 4 (84) (2013) 24–27.
- [27] **B.G. Tuvalbayev, V.I. Moiseyev**, Utilizatsiya snego-ledovoy massy – odna iz perspektivnykh munitsipalnykh zadach, reshayemykh gorodskoy TETs [Utilization of snow-ice mass is one of the promising municipal tasks solved by the city CHPP], Energoberezheniye i vodopodgotovka, 1 (87) (2014) 8–13.
- [28] **B.G. Tuvalbayev, V.I. Moiseyev**, Ispolzovaniye kisloroda sputnoy vyrabotki dopolnitelnogo proizvodstva v tekhnologicheskoy protsesse TES [The use of oxygen satellite production of additional production in the process of thermal power plants], Energoberezheniye i vodopodgotovka, 4 (90) (2014) 40–43.
- [29] **B.G. Tuvalbayev, M.Ye. Marchenko, Ye.M. Marchenko, D.Sh. Valitov**, Kontseptualnyye napravleniya razvitiya teploenergetiki [Conceptual directions of development of thermal energy], Energoberezheniye i vodopodgotovka, 3 (107) (2017) 3–9.
- [30] **R.Z. Aminov, M.K. Krylov, A.N. Bayramov**, Puti ekonomii organicheskogo topliva pri ispolzovanii vodorodnykh tekhnologiy na AES [Ways of saving organic fuel when using hydrogen technologies at nuclear power plants], Problemy sovershenstvovaniya toplivno-energeticheskogo kompleksa, 4 (2006) 56.
- [31] **R.Z. Aminov, A.N. Bayramov**, Effektivnost proizvodstva vodoroda na osnove sovremennykh tekhnologiy [Production efficiency of hydrogen on the basis of modern technologies], Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika, 1 (2009) 128–137.
- [32] **V.M. Batenin, R.Z. Aminov, V.M. Maslennikov, A.F. Shkret, M.V. Gariyevskiy, A.N. Nikulin**,

Kombinirovannyi sposob proizvodstva elektroenergii i zhidko-sinteticheskogo topliva v sostave parogazovoy ustanovki. Pat. 2356877 Rossiyskaya Federatsiya, MPK: C 07 C 27 12, C 07 C 31 04, F 02 C 1 00. № 2007123840/15. Data registratsii 25.06.2007. [The combined method of production of electric power and liquid-synthetic fuel as a part of steam-gas installation.]

[33] **R.Z. Aminov, A.N. Bayramov**, Sistemnaya effektivnost vodorodnykh tsiklov na osnove vnepikovoy elektroenergii AES [System efficiency of hydrogen cycles on the basis of the off-peak electric power of atomic power station], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, 1 (2011) 51–52.

[34] **R.Z. Aminov, D.M. Pron**, Obespecheniye prokhozheniya perioda nochnogo minimuma elektropotrebleniya OES Tsentra s uchetom voda moshchnostey AES [Ensuring the passage of the period of the night minimum power consumption of the UES Center, taking into account the commissioning of nuclear power plants], *Elektricheskiye stantsii*, 6 (983) (2013) 36–39

[35] **R.Z. Aminov, A.N. Bayramov**, Otsenka konkurentnoy effektivnosti polucheniya vodoroda metodom elektroliza vody na osnove vnepikovoy elektroenergii [Estimate of competitive efficiency of hydrogen production by electrolysis of water on basis of the off-peak electricity], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, 4 (2016) 84–90.

[36] **R.Z. Aminov, A.N. Bayramov**, Otsenka effektivnosti polucheniya vodoroda na baze vnepikovoy elektroenergii AES [Performance evaluation of hydrogen production on base of the off-peak electricity of atomic power station], *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 5–6 (193–194) (2015) 59–70.

[37] **R.Z. Aminov, A.F. Shkret, M.V. Gariyevskiy**, Otsenka resursnykh i ekonomicheskikh pokazateley raboty paroturbinnnykh blokov TES pri peremennykh rezhimakh [Estimation of lifespan and economy parameters of steam-turbine power units in thermal power plants using varying regimes], *Teploenergetika*, 8 (2016) 25–31.

[38] **R.Z. Aminov, S.V. Novichkov**, Modifikatsiya skhem GTU v ustanovkakh vozduzhnogo akumulirovaniya [The modification of gas turbine installation at the air-storage gas turbine plant], *Trudy Akademenergo*, 2 (2017) 84–92.

[39] Aminov R.Z., Novichkov S.V. Ispolzovaniye absorbtionnoy bromisto-litiyevoy kholodilnoy mashiny

dlya povysheniya effektivnosti raboty vozduzhno-akkumuliruyushchey gazoturbinnoy elektrostantsii [Use of the absorption lithium bromide refrigerating machine for increase in overall performance of compressed-air power station], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 19 (11–12) (2017) 62–72.

[40] **V.F. Ochkov**, Sokhraneniye i razvitiye teplovykh elektrostantsiy, ili n-generatsiya // Energoberezheniye i vodopodgotovka [Preservation and development of thermal power plants, or n-generation], 1 (105) (2017) 50–61

[41] **V.S. Agababov, U.I. Smirnova, P.A. Tideman**, Razrabotka skhem vysokoeffektivnykh parogazovykh TES s sistemoy odnovremennogo proizvodstva tepla i kholoda [Development of schemes of highly efficient steam and gas thermal power plants with a system of simultaneous heat and cold production], *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike. Yezhemesyachnyy elektronnyy zhurnal*, 8 (2013) 16–25.

[42] **V.S. Agababov, P.A. Tideman**, Issledovaniye effektivnosti PGU teplofikatsionnogo tipa s sistemoy odnovremennogo proizvodstva tepla i kholoda [Study of the efficiency of the heating type CCGT with the system of simultaneous production of heat and cold], *Sbornik dokladov VIII yezhegodnoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy Konferentsii «Povysheniye effektivnosti energeticheskogo oborudovaniya – 2013»*. FBGOU VPO «NIU MEI». M., (2013) 305–312.

[43] Razrabotka i issledovaniye skhem vysokoeffektivnykh parogazovykh TES s sistemoy odnovremennogo proizvodstva tepla i kholoda s ispolzovaniyem nizkopotentsialnoy teploty: otchet o NIR [Development and research of schemes of high-efficiency steam and gas thermal power plants with a system of simultaneous production of heat and cold using low-grade heat: research report] / A.V. Klimenko. M.: OAO «VTI», 2013.

[44] **A.V. Klimenko, V.S. Agababov, A.A. Rogova, P.A. Tideman**, Skhemy PGU-KES i PGU-TETs s sistemami odnovremennogo sovmeshchennogo proizvodstva tepla i kholoda [Diagram of CCP-CPP and CCP-CHPP systems for simultaneous combined production of heat and cold], *Energoberezheniye i vodopodgotovka*, 1 (87) (2014) 20–23.

[45] **A.V. Klimenko, V.S. Agababov, V.D. Rozhnatovskiy, Yu.O. Baydakova, A.A. Rogova, P.A. Tideman**, Otsenka tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti trigeneratsii v parogazovoy ustanovke s parokompressionnym teplovym



nasosom [Evaluation of technical and economic efficiency of regeneration in a steam-gas installation with a steam-compression heat pump], *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike. Yezhemesyachnyy elektronnyy zhurnal*, 12 (2013) 5–14

[46] **A.V. Klimenko, V.S. Agababov, Yu.O. Baydakova, A.A. Rogova, U.I. Smirnova, P.A. Tideman**, Trigeneratsionnaya ustanovka s ispolzovaniyem parogazovogo tsikla dlya proizvodstva elektroenergii i parokompressionnogo teplonasosnogo tsikla dlya proizvodstva tepla i kholoda [Trigeneration plant with use of combined cycle for electricity production and heat pump vapor compression cycle to produce heat and cold]. Pat. 2530971 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F01K23/06; zayavitel i patentoobladatel OAO «VTI». № 2013137038/06; zayavl. 08.08.2013; opubl. 20.10.2014, *Byul. № 29*.

[47] **V.S. Agababov, A.A. Sukhikh, K.I. Kuznetsov, A.A. Rogova, A.A. Korshikova**, Eksperimentalnyye issledovaniya rezhimov raboty teplonasosnoy ustanovki pri sovместной vyrabotke teploty i kholoda [Experimental studies of the modes of operation of the heat pump installation in the joint production of heat and cold], *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike. Yezhemesyachnyy elektronnyy zhurnal*, 9 (2012) 26–38.

[48] **A.V. Klimenko, V.S. Agababov, N.O. Baydakova, Yu.O. Baydakova, Ye.N. Oleynikova, P.A. Tideman**, Vliyaniye temperatury naruzhnogo vozdukhа na termodinamicheskuyu effektivnost PGU s ustanovkoy dlya odnovremennoy generatsii tepla i kholoda [The influence of outdoor temperature on the thermodynamic efficiency of the combined cycle plant for simultaneous generation of heat and cold], *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike. Yezhemesyachnyy elektronnyy zhurnal*, 10 (2013) 5–19.

[49] **A.V. Klimenko, V.S. Agababov, A.A. Rogova, P.A. Tideman**, Osobennosti kombinirovannogo proizvodstva elektroenergii, tepla i kholoda na baze parogazovoy ustanovki [Specific features of combined generation of electric power, heat, and cold by combined-cycle plants], *Teplenergetika*, 3 (2015) 11–15.

[50] **M.A. Lapid, V.M. Batenin, V.M. Maslennikov, A.D. Tsoy**, Ekologicheski chistyye energogeneriruyushchiye kompleksy na baze gazoturbinnnykh nadstroyek vodogreynnykh kotlov [Environmentally friendly power generating complexes based on gas turbine superstructures of hot water boilers], *Novosti teplosnabzheniya*, 1 (17) (2002) 41–46.

[51] **S.V. Kuznetsov**, Nadstroyka kotelnykh gazoturbinnnykh ustanovkami [Add-in boiler gas turbine], *Novosti teplosnabzheniya*, 10 (14) (2001) 36–37.

[52] **A.M. Karasevich, Ye.V. Semnova, A.V. Fedyayev, O.N. Fedyayeva**, Effektivnost razvitiya malyykh TETs na baze gazoturbinnnykh i dizelnykh energoustanovok pri gazifikatsii regionov [The efficiency of developing small-scale gas-turbine and diesel-based cogeneration power installations for providing gas to the regions of Russia], *Teplenergetika*, 47 (12) (2000) 1084–1089

[53] *Opredeleniye perspektivnykh napravleniy i razrabotka tekhnicheskikh resheniy, napravlenykh na povysheniye termodinamicheskikh i tekhniko-ekonomicheskikh effektivnostey obyektov raspredelennoy i maloy energetiki za schet ispolzovaniya tekhnologii trigeneratsii: Otchet o NIR [Identification of promising areas and development of technical solutions aimed at improving the thermodynamic and technical and economic efficiency of objects of distributed and small energy through the use of technology of trigeneration: Report on research] / A.V. Klimenko. M.: FGBOU VO «NIU «MEI». 2014.*

[54] **V.S. Agababov, A.Yu. Arkharova, N.V. Malafeyeva**, Ustanovka dlya polucheniya elektroenergii, teploty i kholoda [Installation for electricity, heat and cold]. Pat. 46565 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F 01 K F 25 B 11/02, F 01 K 27/00/; zayavitel i patentoobladatel GOUVPO «MEI (TU)». № 46565/2005; zayavl. 24.03.2004; opubl. 10.07.2005, *Byul. № 16*

[55] **F.A. Gaysin, A.T. Mantashov**, Trigeneratsionnaya gazoturbinnaya ustanovka [Trigeneration gas turbine installation.]. Pat. 2369808 Rossiyskaya Federatsiya, F 25 B 11/00; zayavitel i patentoobladatel OOO «Aviadvigatel». № 2369808/2009; zayavl. 26.11.2007; opubl. 10.10.2009, *Byul. № 28*.

[56] **A.I. Bazhenov, Ye.V. Mikhayeva, Yu.M. Khlebalin**, Sposob kombinirovannogo proizvodstva elektroenergii, tepla i kholoda [Method of combined production of electricity, heat and cold]. Pat. 2457352 Rossiyskaya Federatsiya, F 02 G 5/00/ zayavitel i patentoobladatel Saratov. GBOUVPO SGTU. № 2399781/2010; zayavl. 21.12.2010; opubl. 27.07.2012, *Byul. № 24*.

[57] **S.V. Kuznetsov**, Opyt primeneniya porshnevnykh dvigateley dlya kombinirovannoy vyrabotki elektricheskoy i teplovooy energii redaktsiya «NT» [Experience in the use of piston engines for the combined generation of electric and thermal energy]. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/83-Opyt-primeneniya-porshnevnyh-dvigateley-dlya-kombinirovannoy>

- [58] **A.V. Klimenko, V.S. Agababov, I.P. Ilina, V.D. Rozhnatovskiy, A.V. Burmakina**, Skhemy trigeneratsionnykh ustanovok dlya tsentralizovannogo energosnabzheniya [Layouts of trigeneration plants for centralized power supply], *Teploenergetika*, 6 (2016) 36–43.
- [59] **V.S. Agababov, A.V. Koryagin, Ye.V. Dzhurayeva**, Proizvodstvo elektroenergii v detander-generatornykh agregatakh s odnovremennym otpuskom teploty razlichnykh temperaturnykh urovney (teploty i kholoda) [Power generation in expander-generator units with simultaneous release of heat of different temperature levels (heat and cold)], *Ratsionalnoye ispolzovaniye prirodnogo gaza v metallurgii: sb. tez. mezhd. nauch.-praktich. konf. (Moskva, 13–14 noyabrya 2003 g.)*. M.: MISIS, 2003.
- [60] **Vybor metodov opredeleniya energeticheskoy i tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti, termodinamicheskii analiz protsessov v ustanovkakh dlya proizvodstva elektroenergii, teploty i kholoda na baze detander-generatornykh agregatov i vozobnovlyayemykh istochnikov energii: otchet o NIR** [Selection of methods for determining energy and technical and economic efficiency, thermodynamic analysis of processes in plants for the production of electricity, heat and cold on the basis of expander-generator units and renewable energy sources: research report] / **V.S. Agababov**. M.: Intekhenergo-inzhiniring, 2007.
- [61] **V.S. Agababov**, Sposob raboty detandernoy ustanovki i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya [Method of operation of the expander unit and the device for its implementation]. Pat. 2150641 Rossiyskaya Federatsiya 7 F 25 B 11/02, F 01 K 27/00/; zayavitel i patentoobladatel Moskovskiy energeticheskii institut (TU). №2150641; zayavl. 15.06.1999; opubl. 10.06.2000, *Byul.* № 16.
- [62] **V.S. Agababov, Ye.V. Dzhurayeva, A.Yu. Arkharova**, Ustanovka dlya proizvodstva elektroenergii na baze DGA, vozduzhnykh turbiny i kompressora [Installation for the production of electricity on the basis of expander-generator unit, wind turbine unit and compressor], *Vestnik MEI*, 2 (2007) 48–53.
- [63] **Y. Mishner, V.S. Agababov, Ye.V. Dzhurayeva, Ye.S. Solovyeva, S.V. Kamenskiy**, Bestoplivnaya energeticheskaya ustanovka, vklyuchayushchaya v sebya detander-generatornyy agregat, vozduzhnyy kompressor i vozduzhnyy turbinu [Fuel-free power plant, which includes an expander generator set, an air compressor and an air turbine], *Energoberezheniye i vodopodgotovka*, 6 (2007) 61–63.
- [64] **V.S. Agababov, O.Yu. Uklechev**, Bestoplivnaya ustanovka dlya proizvodstva elektroenergii i teploty [Fuel-less installation for the production of electricity and heat], *Energoberezheniye i vodopodgotovka*, 6 (2008) 36–39.
- [65] **V.S. Agababov, U.I. Smirnova, A.M. Kolosov**, Otsenka effektivnosti raboty bestoplivnykh energogeneriruyushchikh ustanovok dlya proizvodstva elektroenergii v sisteme gazosnabzheniya [Evaluation of the efficiency of fuel-free power generation plants for power generation in the gas supply system], *Vestnik MEI*, 2 (2010) 15–20.
- [66] **V.S. Agababov, A.V. Koryagin**, Bestoplivnyye detander-generatornyye ustanovki [Fuel-free expander-generator sets]. M.: Izdatelskiy dom MEI, 2011.
- [67] **V.S. Agababov, Yu.O. Baydakova, P.A. Kostyuchenko**, Analiz vliyaniya parametrov raboty bestoplivnoy energogeneriruyushchey ustanovki na yeye effektivnost [Analysis of the influence of the parameters of the fuel-free power generating plant on its efficiency], *Energoberezheniye i vodopodgotovka*, 1 (2011) 71–73.
- [68] **V.S. Agababov, Yu.O. Baydakova**, Matematicheskoye opisaniye skhem bestoplivnykh ustanovok generatsii elektroenergii na baze odno- i dvukhstupenchatykh detander-generatornykh agregatov i teplonasosnykh ustanovok parokompressionnogo i vozduzhnogo tipov [Mathematical description of schemes of fuel-free power generation units based on one- and two-stage expander-generator units and heat pump units of vapor compression and air types], *Energoberezheniye i vodopodgotovka*, 1 (81) (2013) 39–42.
- [69] **V.S. Agababov, Yu.O. Baydakova, N.I. Timoshenko**, Otsenka pokazateley effektivnosti investitsiy v stroitelstvo bestoplivnykh ustanovok generatsii elektroenergii na baze detander-generatornykh agregatov i teplonasosnykh ustanovok parokompressionnogo i vozduzhnogo tipov [Evaluation of efficiency indicators of investments in the construction of fuel-free power generation plants on the basis of expander-generator units and heat pump units of vapor compression and air types], *Energoberezheniye i vodopodgotovka*, 3 (83) (2013) 63–65.
- [70] **A.A. Rogova**, Perspektivy razvitiya bestoplivnykh trigeneratsionnykh tekhnologiy [Prospects of development of fuel-free trigeneration technologies], *Energiya*. 2013: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. Ivanovo, (2013) 186–187.
- [71] **V.S. Agababov, Yu.O. Baydakova**, Otsenka termodinamicheskoy i ekonomicheskoy effektivnostey ustanovok bestoplivnoy generatsii elektroenergii na osnove



odno- i dvukhstupenchatykh detander-generatornykh agregatov i parokompressionnykh teplovykh nasosov [Assessment of thermodynamic and economic efficiency plants fuelless electricity generation based on single and two-stage expansion generating units and vapor compression heat pumps], *Izvestiya akademii nauk. Energetika*, 4 (2014) 50–54.

[72] **A.V. Klimenko, V.S. Agababov, A.V. Koryagin, Yu.O. Baydakova**, Generatsiya kholoda s primeneniym detander-generatornykh agregatov [Refrigeration generation using expander-generator units], *Teploenergetika*, 5 (2016) 37–44.

[73] **V.S. Agababov, S.N. Petin, P.N. Borisova**, Termodinamicheskiy analiz skhemy bestoplivnoy ustanovki dlya odnovremennoy generatsii elektroenergii i kholoda [Thermodynamic analysis of the fuel-free plant scheme for simultaneous generation of electricity and cold], *Energoberezheniye i vodopodgotovka*, 4 (102) (2016) 39–45.

[74] **V.S. Agababov, P.N. Borisova**, Skhema ustanovki dlya bestoplivnoy generatsii elektroenergii i kholoda [Scheme of installation for fuel-free power generation and cold], *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike. Yezhemesyachnyy elektronnyy zhurnal*, 8 (2016) 29–37.

[75] **V.S. Agababov, P.N. Borisova, S.N. Petin**, Termodinamicheskiy analiz ustanovki dlya odnovremennoy generatsii elektroenergii i kholoda dvukh temperaturnykh potentsialov [Thermodynamic analysis of the plant for simultaneous generation of electricity and cold of two temperature potentials], *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike. Yezhemesyachnyy elektronnyy zhurnal*, 4 (2017) 37–47.

[76] **A.V. Klimenko, V.S. Agababov, P.N. Borisova**, Vozmozhnost proizvodstva kholoda i dopolnitelnoy elektroenergii na teplovykh elektrostantsiyakh [On the possibility of generation of cold and additional electric energy at thermal power stations], *Teploenergetika*, 6 (2017) 30–37.

THE AUTHORS

KLIMENKO Aleksandr V. – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*

E-mail: klimenkoav@bk.ru

AGABABOV Vladimir S. – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*

E-mail: agababovvs@yandex.ru

BORISOVA Polina N. – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*

E-mail: borisovapn@gmail.com

Received: 13.05.2019