

Отечественные разработки высокоэффективных микрогазотурбинных энергоустановок

Современные паргазовые установки (ПГУ) большой мощности являются наиболее совершенными устройствами преобразования химической энергии органического топлива в электричество. Топливная эффективность (КПД) мощных ПГУ последних поколений превышает 62%, однако в энергетике в основном эксплуатируются установки с КПД 58...60%. Высокая эффективность достигается увеличением агрегатной мощности генерирующего оборудования (более 300 МВт в одном газотурбинном двигателе (ГТД)).

Мощные ПГУ находят эффективное применение в крупных энергосистемах в составе объединенных энергетических систем, обеспечивающих возможность энергоснабжения потребителей по протяженным разветвленным электрическим сетям высокого, среднего и низкого напряжения с охватом больших территорий.

Вместе с тем централизованное энергоснабжение на базе электростанций большой мощности оказывается эффективным лишь в случае превышения некоего предельного значения удельного энергопотребления в расчете на единицу площади территории, где расположены потребители. При низких плотностях энергопотребления эффективность использования крупных энергоустановок снижается в связи со значительными потерями энергии в электрических сетях и на преобразующих устройствах.

Кроме того, в условиях рассредоточения потребителей на значительных территориях непомерно возрастают капитальные затраты на обустройство электрических сетей. В условиях России такая ситуация характерна для многих развивающихся удаленных от централизованных систем энергоснабжения районов, где развитие малой распределенной генерации (МРГ) становится более экономически целесообразным, чем централизованной.

Сегодня МРГ базируется преимущественно на дизельных генераторах единичной мощностью от 30 кВт до 3 МВт, потребляющих дизельное топливо и имеющих КПД на уровне 35–40%. Дизельные энергоустановки обеспечивают энергоснабжение потребителей в Арктике, на Дальнем Востоке и в других отдаленных районах страны.

Вместе с тем им присущи существенные недостатки:

- частая периодичность технического обслуживания (ТО) – через каждые 250–350 часов эксплуатации (замена масла, фильтров и т.п.);
- значительное повышение удельного расхода топлива при отклонении мощности более 20% от номинальной, что существенно снижает интегральный КПД энергоустановки;
- монотопливность или возможность работы только на дизельном топливе.

В последнее время на основе использования современных научно-технических достижений в ряде ведущих стран мира ведутся разработки и находят все более широкое практическое применение в МРГ микрогазотурбинные энергоустановки (МГТУ), которые потенциально обладают характеристиками, обеспечивающими их высокую конкурентоспособность по отношению к дизель-генераторам, и отвечают требованиям использования в распределенных сетях генерации.

МГТУ мощностью от нескольких десятков кВт до нескольких сотен кВт, реализованные на простом термодинамическом цикле Брайтона, в отличие от используемых в ПГУ крупных ГТУ, из-за невозможности достижения высокой степени совершенства газодинамики проточных частей, термодинамической и кинематической схемы установки не могут обеспечить высокий КПД преобразования энергии.

Так, отечественные и зарубежные МГТУ с ГТД «простого» цикла имеют КПД не более 15%. Однако, как показывал анализ (см. Косой А. С., Попель О. С., Бесчастных В. Н., Зейгарник Ю. А., Синкевич М. В. Газотурбинные установки малой мощности в энергетике: пути повышения эффективности и масштабов внедрения // Теплоэнергетика. 2017. № 10. С. 25–32.), существует множество резервов увеличения эффективности МГТУ, связанных с совершенствованием термодинамических, механических, электро-механических и электронных процессов преобразования энергии.

Прежде всего оно может быть обеспечено путем использования регенеративного цикла Брайтона, в котором реализуется внутрицикловая рекуперация тепла.

На рис. 1 приведена тепловая схема термодинамического цикла МГТУ с рекуперацией тепла газов, выходящих за турбиной. Атмосферный воздух поступает в камеру сгорания, куда подается также топливо. В результате сгорания топлива температура рабочего тела за камерой сгорания повышается. Горячий

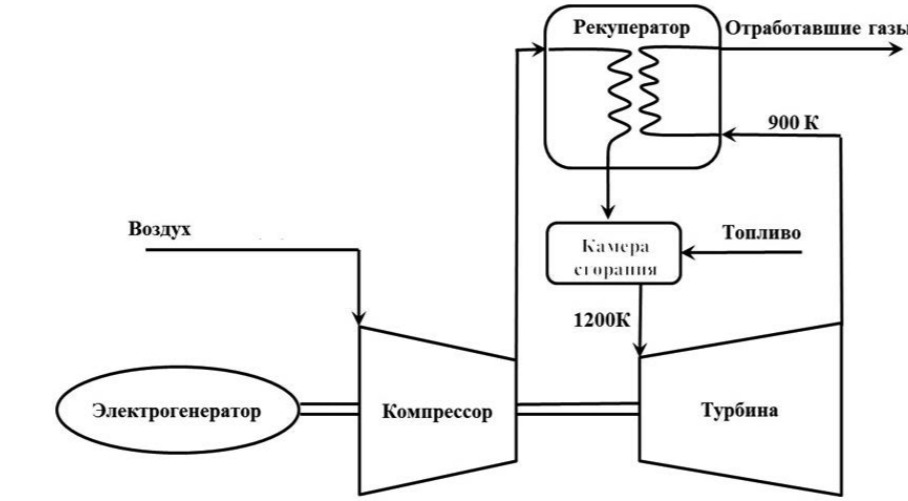


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема рекуперативного ГТД

газ из камеры сгорания поступает в сопловой аппарат турбины, разгоняется и направляется в рабочее колесо турбины. В рабочем колесе турбины газ совершает работу, необходимую для привода компрессора и электрогенератора.

У большинства МГТУ конструктивная схема одновальная. Компрессор – одноступенчатый центробежный. В отличие от ГТУ большой мощности, охлаждение деталей проточной части, обеспечивающее возможность увеличения начальной температуры рабочего тела в двигателях малой мощности, технически нереализуемо. Рост начальной температуры обеспечивается целиком за счет применения жаропрочных материалов. Для современных широко распространенных материалов приемлемы температуры 1200 К перед турбиной и 900 К за турбиной.

В идеальном рекуперативном цикле при ограничениях на температуру рабочего тела (1200 К перед турбиной и 900 К за турбиной) и стандартной температуре атмосферного воздуха (288 К) предельный достижимый КПД составляет 68%. Имеющиеся ограничения эффективности агрегатов ГТД снижают это значение. Так, тепловая эффективность МГТУ С-30 фирмы Capstone мощностью 30 кВт при адиабатическом КПД компрессора 0,77, адиабатическом КПД турбины 0,87, суммарных потерях полного давления 12% и степени рекуперации 0,87 составляет 35%.

Необходимо отметить, что существенное снижение КПД МГТУ происходит

также в процессе преобразования и передачи энергии (подшипники, электрогенератор, выпрямитель, инвертор, трансформатор). На таких преобразованиях, по экспертной оценке, МГТУ С-30 теряет еще около 8% КПД.

Таким образом, практически один из лучших зарубежных образцов МГТУ С-30 имеет КПД 28%, что уступает эффективности установок аналогичной мощности с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Однако при возможном повышении экономичности таких машин уже на 5...8% преимущества газотурбинных агрегатов перед ДВС становятся неоспоримыми.

К этим преимуществам относятся:

- отсутствие необходимости в постоянном техническом обслуживании. Это достигается путем использования высокооборотных (до 100 тыс. оборотов в минуту) газовых турбин на воздушных подшипниках, что позволяет избавиться от масляных систем;
- возможность сохранения низкого удельного потребления топлива в широком диапазоне изменения мощности в результате использования современных интеллектуальных электротехнических систем преобразования электрической энергии;
- возможность создания политопливных энергоустановок, работающих как на дизельном топливе, так и на природном газе, СПГ и других видах топлива;
- относительно небольшие масса и габариты;

- более надежный запуск в холодных условиях;
- низкий шум и вибрации.

Учитывая эти обстоятельства, ПАО «НПО «Алмаз» совместно с Объединенным институтом высоких температур РАН приступили к реализации проекта создания ключевых технологий, обеспечивающих возможность отечественной промышленности осуществлять выпуск высокоэффективных энергетических МГТУ. Совместное решение ОИВТ РАН и ПАО «НПО «Алмаз» опирается на постановление Правительства РФ по опережающему развитию Арктической зоны и других удаленных районов России, выполнение которых невозможно без создания в этих районах эффективной энергетической инфраструктуры, базирующейся на развитии малой распределенной энергетики, основой которой могут стать МГТУ нового поколения.

Разработка технологий осуществляется в следующих направлениях:

- высокотемпературные газовые теплообменники;
- высокоэффективные лопаточные машины;
- высокооборотные турбогенераторы;
- эффективные системы управления и преобразования электрической энергии (САУ и СПЭ);
- высокотемпературные лепестковые газодинамические подшипники (ЛГДП).

В обеспечение проведения НИОКР по данным направлениям в ОИВТ РАН созданы специальные научно-технологические стенды. Так, для отработки компрессоров и турбин с целью повышения их эффективности разработан уникальный стенд физического газодинамического эксперимента (Стенд физического газодинамического эксперимента (ФГДЭ)) // Интернет-ресурс: <https://www.youtube.com/watch?v=xrCkg1BJTQ>.

Стенд предназначен для проведения испытаний макетов центробежных компрессорных ступеней и радиальных турбинных ступеней в модельных условиях. Организация испытаний при низких (криогенных) температурах и давлении обеспечивает возможность использования макетов из полимеров и металлов, полученных при помощи аддитивных технологий, что значительно сокращает время получения характеристик испытываемого объекта и снижает стоимость работ.

Для оснащения стенда разработан и изготовлен специальный контейнер датчиков давления, который позволяет проводить измерения давления в большом количестве точек в исследуемом объекте, с возможностью самодиагностики и калибровки датчиков в процессе проведения испытаний.

Для отработки ЛГДП изготовлены подшипниковый и роторный стенды (рис. 2). Подшипниковый стенд снабжен устройством нагрева подшипника в обеспече-

ние отработки высокотемпературных антифрикционных покрытий.

Для исследований высокотемпературных теплообменников разработан стенд рекуператоров (рис. 3).

Стенд позволяет моделировать натурные условия по теплоносителям с помощью внешнего компрессора и электрического нагревателя и определять тепловые и газодинамические характеристики теплообменников.

Имеются также стенды для отработки высокооборотных турбогенераторов, САУ, системы преобразования энергии, МГТУ, топливной и других вспомогательных систем (рис. 4). Уникальность созданных стендов подтверждается полученными патентами.

В настоящее время создана и доведена до промышленного внедрения не имеющая аналогов технология изготовления пластинчатых теплообменников для МГТУ мощностью 30 кВт, которая обеспечивает высокие характеристики рекуператора. Инновационные технологические решения защищены десятками патентов.

В сотрудничестве с отечественной компанией ООО «Моделирование и инжиниринг» (г. Брянск), создателем антифрикционных покрытий, разработана технология нанесения прецизионных высокотемпературных покрытий на гибких пластинах лепестковых газодинамических подшипников. Успешно отработано использование покрытия с работоспособностью до 600 °С, ведутся работы по повышению данной температуры.

Проводимые в ОИВТ РАН испытания на подшипниковом стенде в режиме «пуск-останов» показывают перспективность данных разработок. Помимо теплостойкости, к особенностям и достоинствам новых покрытий необходимо отнести также их коррозионную стойкость, низкий коэффициент трения, высокую износостойкость при пусках, остановках и кратковременных высокоскоростных контактах, технологичность при нанесении композиции и экологическую безопасность.

Прогнозируемые сроки службы лепестковых газодинамических подшипников с новыми покрытиями исчисляются сотнями тысяч часов.



Рис. 2. Стенд для исследований работы ЛГДП

Наиболее важное требование к энергетическим установкам, эксплуатируемым в труднодоступных регионах, – обеспечение длительной работы в автономном режиме без обслуживающего персонала. Новое поколение МГТУ будет способно работать автономно на объекте без постоянного присутствия персонала, и нуждаться в обслуживании не чаще одного раза в год.

К числу ключевых технологий, необходимых для решения этих задач, следует отнести:

- векторные системы преобразования энергии, обеспечивающие все режимы работы МГТУ;
- высокооборотные электрические машины с роторами на постоянных магнитах.

Учитывая перспективность развития малой энергетики и необходимость обеспечения импортозамещения генерирующего оборудования отечественной промышленностью, АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» поддержал инновационный проект ПАО «НПО Алмаз» – ОИВТ РАН по созданию высокоэффективной МГТУ мощностью 30 кВт, с расширением номенклатуры мощностного ряда до 200 кВт.

АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» выступил инициатором разработки комплексного научно-технического проекта полного инновационного цикла «Разработка критических технологий высокоэффективных политопливных микрогазотурбинных энергоустановок мощностью до 600 °С, ведутся работы по повышению данной температуры.

Проводимые в ОИВТ РАН испытания на подшипниковом стенде в режиме «пуск-останов» показывают перспективность данных разработок. Помимо теплостойкости, к особенностям и достоинствам новых покрытий необходимо отнести также их коррозионную стойкость, низкий коэффициент трения, высокую износостойкость при пусках, остановках и кратковременных высокоскоростных контактах, технологичность при нанесении композиции и экологическую безопасность.

Прогнозируемые сроки службы лепестковых газодинамических подшипников с новыми покрытиями исчисляются сотнями тысяч часов.



Рис. 3. Монтаж стенда рекуператоров

тических узлов для высокоэффективных энергетических МГТУ с освоением серийного выпуска отечественных конкурентоспособных МГТУ мощностью 30 кВт и выполнено строительство опытно-промышленной полигон-электростанции мощностью 60 кВт. Будет разработана новая методология проектирования перспективного энергетического оборудования, предусматривающая активное использование отечественных инновационных технологий, в частности суперкомпьютерное оптимизационное моделирование, сквозную газодинамическую доводку, аддитивные технологии, системы автоматизированного проектирования, а также сформирована база данных наилучших конструкторских, технологических и цифровых решений для создания эффективного, надежного энергетического оборудования и систем автономного энергоснабжения нового поколения, разработаны программы управления кластерами МГТУ в составе электростанции. Будут выполнены аванпроекты МГТУ мощностью 8, 100 и 200 кВт с КПД 0,30–0,42, что находится на уровне лучших поршневых машин.

Повышение общей топливной эффективности может быть обеспечено не только повышением КПД самих МГТУ, но и использованием современных технологий интегрирования топливных энергоустановок с установками на возобновляемых источниках энергии и накопителями энергии с применением интеллектуальных систем автоматического управления.

Планируемые сроки выполнения проекта – 2023–2027 годы.

Д.т.н., заведующий отделом проблем теплоэнергетики ОИВТ РАН Александр Семёнович Косой

К.т.н., главный конструктор Научно-производственного центра «Системы автономного энергоснабжения» отдельного конструкторского бюро «Лианозовский электромеханический завод» ПАО «НПО «Алмаз» Владимир Николаевич Бесчастных

Д.т.н., главный научный сотрудник ОИВТ РАН Олег Сергеевич Попель



Рис. 4. Тепломеханический блок МГТУ на испытательном стенде

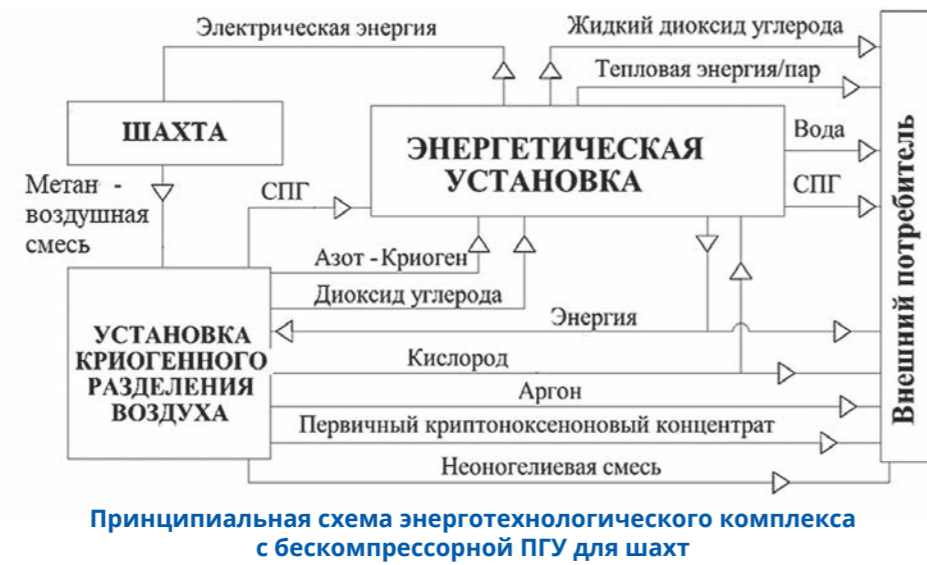
ТЭЦ без выхлопа CO₂ в атмосферу

Наша страна, как и большинство ведущих зарубежных стран, все больше внимания уделяет борьбе с антропогенными выбросами в атмосферу парниковых газов, в том числе CO₂. Один из основных источников выбросов углекислого газа связан с производством электрической и тепловой энергии. Несмотря на большие усилия, направленные на развитие технологий возобновляемых источников энергии, органическое топливо еще долго будет доминировать в энергетике. Поэтому улавливание CO₂, образовавшегося при сгорании органического топлива, приобретает особую значимость.

Эта тематика стала приоритетной в работе Совета по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирования новых источников, способов транспортировки и хранения энергии», который возглавляет академик Сергей Петрович Филиппов, директор Института энергетических исследований РАН. На одном из последних заседаний Советом рассмотрена и поддержана заявка на комплексный научно-технический проект полного инновационного цикла (КНТП) «Создание бескомпрессорной парогазовой установки с внутрицикловым улавливанием CO₂ в жидкой фазе (ТЭЦ без выбросов)», нацеленный на разработку и промышленное освоение новой экономически доступной технологии производства электроэнергии, со значительным уменьшением выбросов парниковых газов в атмосферу. КНТП предполагает создание первой в России энергетической установки мощностью 60 МВт на сверхкритическом диоксиде углерода.

Коэффициент полезного действия (КПД) лучших энергетических парогазовых установок (ПГУ) уже превышает 60%. Но, учитывая место, которое занимает энергетика в жизнедеятельности человечества, требования к энергетическим установкам постоянно растут. Имеются еще существенные резервы повышения эффективности использования топлива за счет совместной выработки электроэнергии и тепла с одновременным выполнением жестких экологических требований. Ведется поиск новых циклов и схем, позволяющих сократить выбросы в атмосферу образовавшегося в результате сгорания топлива углекислого газа. Один из таких циклов и схема, реализующая его, предложены сотрудниками ОИВТ РАН.

При разработке этого цикла акценты были расставлены следующим образом: в первую очередь рассматривалась возможность обеспечения вывода CO₂ из цикла электростанции в жидком виде – наиболее удобном для хранения, транспортировки и дальнейшего полезного использования. Как показал анализ, такое решение относительно просто и эф-



Принципиальная схема энерготехнологического комплекса с бескомпрессорной ПГУ для шахт

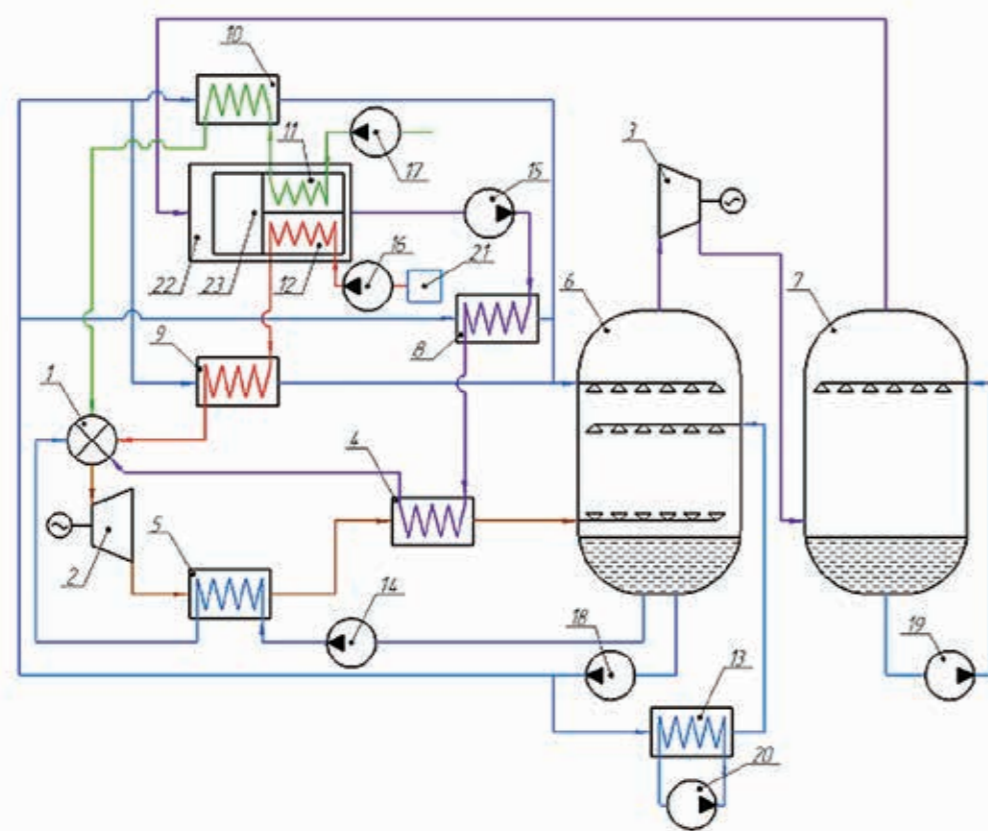
фективно реализуется технически при организации сжигания органического топлива в кислороде, что одновременно обеспечивает и меньшие затраты на извлечение CO₂, чем это требуется при известных способах его извлечения из газообразных продуктов сгорания, выбрасываемых в трубу. Второй акцент был сделан на разработку термодинамического цикла, обеспечивающего высокую

эффективность совместного производства электрической и тепловой энергии, что особенно важно для климатических условий большинства регионов России. При этом внимание уделялось и обеспечению приемлемого КПД в случае генерации только электрической энергии.

Технология «кислородного сжигания топлива» активно разрабатывается рядом энергетических компаний в

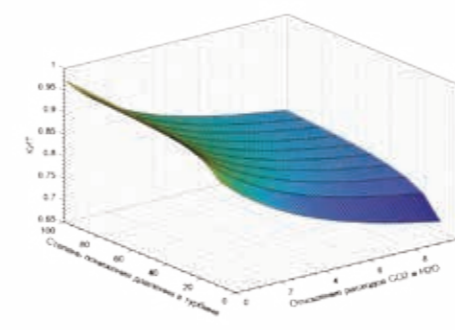
мире. Эта технология предусматривает предварительное разделение воздуха с выделением относительно чистого кислорода, в котором происходит сжигание топлива. Требуемая температура на выходе из камеры сгорания обеспечивается за счет рециркуляции отработавших в цикле продуктов сгорания (CO₂ и/или H₂O). Циклы, использующие эту технологию, являются полужамкнутыми. Большая часть рабочего тела, представляющего собой смесь CO₂ и H₂O, циркулирует внутри цикла. Частично идет пополнение рабочего тела за счет сжигания топлива в окислителе. Температуры конденсации CO₂ и H₂O отличаются друг от друга, поэтому их легко разделить и избытки CO₂ и H₂O в разделенном виде вывести из цикла. Технология кислородного сжигания топлива лежит в основе предложенного цикла ОИВТ.

При совместном производстве электрической и тепловой энергии исключительно большое значение имеет возможность гибкого регулирования их отпуска в соответствии с графиками потребления электрической и тепловой энергии, которые, как правило, не совпадают. Если генерирующая установка



Расчетная схема:
1 – камера сгорания, 2 – турбина, 5 – компрессор CO₂, 4 – рекуператор CO₂, 5 – рекуператор H₂O, 6 – контактный конденсатор низкого давления, 7 – контактный конденсатор высокого давления, 8 – подогреватель CO₂, 9 – подогреватель кислорода, 10 – подогреватель топлива, 11 – утилизатор холода кислорода, 12 – утилизатор холода топлива, 13 – подогреватель сетевой воды, 14 – насос питательной воды, 15 – насос CO₂, 16 – насос кислорода, 17 – насос топлива, 18 – насос внутреннего циркуляционного контура низкого давления, 19 – насос внутреннего циркуляционного контура высокого давления, 20 – насос сетевой воды, 21 – ВРУ, 22 – устройство ожигения CO₂, 23 – холодильная установка устройства ожигения CO₂.

Обозначения линий на расчетной схеме:
— труборазъемы и арматура H₂O,
— труборазъемы и арматура O₂,
— труборазъемы и арматура CO₂,
— труборазъемы и арматура CH₄,
— труборазъемы и арматура продуктов сгорания.

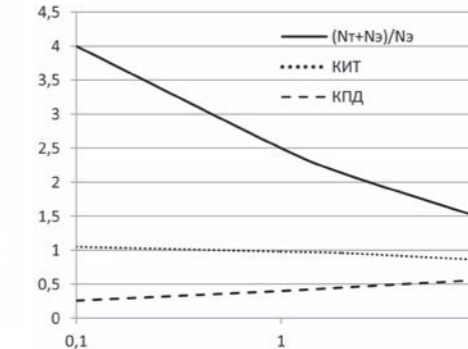


Зависимость КПД от температуры и соотношения расходов CO₂/H₂O

не имеет возможности независимой генерации, то дополнительно приходится использовать малоэффективные установки раздельной генерации, которые будут согласовывать графики потребления и генерации.

Проведенные исследования показали, что при постоянных параметрах цикла (температуре и давлении на входе в турбину, степени расширения в турбине) соотношение генерируемой электрической и тепловой энергии сильно зависит от соотношения CO₂ и H₂O в потоке рециркуляции. Поэтому в схеме ОИВТ CO₂ и H₂O подаются в камеру сгорания отдельно и имеют возможность независимого регулирования. Это несколько усложняет систему регулирования установки (предусматривается независимое регулирование подачи четырех компонентов - CH₄, O₂, CO₂ и H₂O), но при этом появляется и четыре степени свободы, что обеспечивает возможность регулировать в широком диапазоне генерацию требуемых в данный момент времени электрической и тепловой мощностей при сохранении номинальной температуры рабочего тела на входе в турбину и минимально необходимого избытка окислителя. Поддержание на всех рабочих режимах номинальной температуры рабочего тела на входе в турбину и минимально необходимого избытка окислителя обеспечивает высокую топливную эффективность во всем эксплуатационном диапазоне генерирующего объекта.

Для упрощения регулирования подачи компонентов рабочего тела в камеру сгорания предложено отказаться от компрессоров для повышения давления этих компонентов. Дело в том, что компрессоры потребляют относительно большую мощность привода и имеют большие зоны неустойчивой работы. Эти недостатки значительно меньше присущи насосам. Поэтому в цикле ОИВТ перед повышением давления для подачи в камеру сгорания все четыре исходные части рабочего тела переводятся в жидкую фазу (чтобы подчеркнуть это решение, в начальных публикациях авторы использовали название «бескомпрессорная



Зависимость КПД, КИТ и отношения общей генерируемой мощности к электрической от отношения расхода CO₂ к расходу H₂O (логарифмическая шкала)

ПГУ)». Безусловно, на перевод в жидкую фазу требуются затраты энергии, но они, с одной стороны, компенсируются уменьшением работы повышения давления, а с другой стороны, исходное состояние топлива и кислорода могут быть изначально жидкими. После повышения давления холод низкипящих компонентов (CH₄, O₂) может быть использован для ожигения выше кипящих компонентов (CO₂, H₂O), тем самым уменьшая затраты энергии. На последующих стадиях проектирования система получения исходных жидких продуктов может быть основательно оптимизирована.

Есть множество причин, по которым может потребоваться генерация только электрической энергии. В этом случае важно, чтобы разрабатываемая энергоустановка при генерации только электрической энергии имела КПД, не уступающий альтернативным генерирующим установкам. Высокий КПД предлагаемого цикла достигается за счет рекуперации тепла отработавшего в турбине рабочего тела. Предлагаемый цикл ОИВТ и реализующая его схема предполагают развитую систему теплообменного оборудования. Эффективность этого теплообменного оборудования будет играть ключевую роль в достижении высокого КПД.

Сравнение бескомпрессорной ПГУ (БкПГУ) с современными ПГУ

Показатель	ПГУ-325	ПГУ-450Т	ПГУ-800	ПГУ лучший мировой	БкПГУ 60 МВт Пилотный образец	БкПГУ 600 МВт Коммерческая электростанция
Производство только электроэнергии						
Мощность электрическая, МВт	325	450	808	600	60	600
КПД без учета затрат на улавливание CO ₂ , %	51,7	51	54,6	62,2	50	54
Затраты энергии на улавливание CO ₂ , %	10-15	10-15	10-15	10-15	1,5	1,5
Доля уловленного CO ₂ , %	90	90	90	90	~100	~100
КПД с учетом затрат на улавливание CO ₂ , %	36,7-41,7	36-41	39,6-44,6	47,2-52,2	48,5	52,5
Совместное производство электричества и тепла						
Условный относительный годовой расход топлива ^[1] без учета затрат на улавливание CO ₂	0,94	0,945	0,92	0,87	0,88	0,85
Условный относительный годовой расход топлива ^[2] с учетом затрат на улавливание CO ₂	1,05-1,1	1,05-1,1	1,03-1,08	0,98-1,03	0,89	0,86

[1] Годовой расход топлива, отнесенный к основному эталону. За условный эталон принята теплофикационная паротурбинная установка Т-250/300-240. Все варианты и условный эталон приведены к равным условиям (установки приведены к равной номинальной мощности, генерируют одинаковое количество энергии с одинаковым температурным графиком).

[2] Условный эталон не корректировался на улавливание CO₂.

Расчетные исследования показали, что цикл ОИВТ позволяет достичь весьма высоких показателей топливной экономичности. Даже при относительно умеренной температуре рабочего тела перед турбиной (1373 К) КПД цикла ОИВТ по отпуску электроэнергии близок к КПД современных ПГУ, а коэффициент использования топлива (КИТ) более 92%.

Изменяя соотношение компонентов рабочего тела, подаваемых в камеру сгорания, можно при постоянной электрической мощности изменять тепловую мощность так, что максимальная тепловая мощность будет превышать минимальную более чем в 6 раз. При этом КИТ будет во всем диапазоне достаточно близок к единице. Такой диапазон регулирования тепловых нагрузок обеспечивает возможность круглогодичного снабжения теплом потребителей без дополнительных пиковых котельных. И эффективную работу летом, обеспечивая только горячее водоснабжение, и в зимний период, покрывая все потребности тепла в самые холодные дни. Отказ от дополнительных пиковых котельных уменьшит как капитальные затраты на строительство, так и эксплуатационные расходы.

Анализ эффективности работы в системах централизованного теплоснабжения показал высокий потенциал их возможного использования в таких системах. При принятой эксплуатационной модели системы централизованного теплоснабжения годовой перерасход топлива (превышение минимального теоретически возможного) составляет менее 20%, тогда как для лучших ПГУ эта величина доходит до 25%, а для паровых турбин – более 35%.

Хорошие перспективы предлагаемые энергетические установки имеют при их использовании в составе энерготехнологических комплексов. Предлагаемый цикл ОИВТ обеспечивает возможность производства и поставки, помимо

механической (электрической) энергии, тепла и холода, еще как минимум трех востребованных «продуктов» – вода/пар, CO₂, кислород и др.), что открывает возможности оптимизации цикла ОИВТ применительно к различным технологическим комплексам химической и строительной индустрии, которые, как правило, помимо электроэнергии и тепла, нуждаются в потреблении значительного количества воды и в ряде случаев углекислого газа (производство удобрений, пластмасс, карбонизированных строительных материалов и т.п.). При этом важной отличительной особенностью предлагаемой энергоустановки является ее способность аккумулировать энергию и другие «продукты» при временном снижении их потребления, а также возможность работы не только на природном газе, но и на СПГ, шахтном метане и других органических топливах.

В настоящее время готовится предложение о КНТП «Создание бескомпрессорной парогазовой установки с внутрицикловым улавливанием CO₂ в жидкой фазе», которое будет направлено в Минобрнауки России для представления на рассмотрение в Правительство РФ. Ведущие энергомашиностроительные компании России выразили желание быть индустриальными партнерами проекта. Разработчики и научное сообщество надеются на поддержку Правительством РФ данного проекта и незамедлительное начало строительства первой в России ТЭЦ без выбросов углекислого газа.

К.т.н., старший научный сотрудник ОИВТ РАН
Михаил Всеволодович Синкевич

Д.т.н., заведующий отделом проблем теплоэнергетики ОИВТ РАН
Александр Семёнович Косой

Д.т.н., главный научный сотрудник ОИВТ РАН
Олег Сергеевич Попель