



ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ТЭС С ВОДОРОДНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

М.М. Султанов, Е.В. Курьянова

Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-5982-8983> ,

sultanov_mm@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть различные варианты тепловых схем электрических станций и дать оценку основным технико-экономическим параметрам. В статье представлены результаты по разработке схем электрических станций мощностью (до 100 кВт) с парогенерирующей водородно-кислородной установкой для моделирования и выбора эффективных вариантов тепловых схем микрогенерационных энергетических установок на этапе проектирования и развития энергетических систем. **МЕТОДЫ.** Выполнен анализ предложенных вариантов тепловых схем с водородно-кислородным парогенератором, включающих схемные решения микрогазотурбинных установок с водородно-кислородным парогенератором, схему парогазовой установки с водородно-кислородным парогенератором и промежуточным перегревом пара, схему паротурбинной установки с водородно-кислородным парогенератором, схему паротурбинной установки с водородно-кислородным парогенератором и одноступенчатым промежуточным перегревом пара, схему паротурбинной установки с водородно-кислородным парогенератором и промежуточным перегревом пара и пароохладителем. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложен вариант тепловой схемы, который позволит определить подход к оценке топливной составляющей себестоимости производства тепловой и электрической энергии для отечественных электростанций. Представлено описание химического способа получения водорода в лабораторных условиях в генераторах водорода на основе гидролиза твердого реагента – алюминия – в реакционном сосуде, при котором контактирование частиц алюминия происходит в жидкой фазе водного раствора едкого натра. Особенностью предложенного способа является наличие возможности регулирования по расходам в магистралях подачи водной суспензии алюминия и водного раствора едкого натра, что позволяет значительно улучшить качество регулирования и снизить затраты на эксплуатацию таких систем. В значительной степени создание таких систем становится возможным при наличии спроса на выработанную электрическую энергию, что определяет необходимость обеспечения высоких значений технико-экономических показателей работы энергетических установок. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Расчетные оценки показали, что удельный расход условного топлива на производство электрической энергии микрогенерационными системами на основе газотурбинных установок с водородным генератором мощностью 5 – 100 кВт составляет от 0,098 до 0,117 кг/кВт·ч.

Ключевые слова: микрогенерационные установки, микро-ГТУ, КПД, использование водорода, парогенерирующая водородно-кислородная установка.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Российской Федерации FSWF-2020-0025 «Разработка методов и анализ способов достижения высокого уровня безопасности и конкурентоспособности объектов энергетических систем на базе цифровых технологий».

Для цитирования: Султанов М.М., Курьянова Е.В. Исследование применения водорода в качестве топлива для улучшения энергетических и экологических показателей работы газотурбинных установок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 2. С. 46-55. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-46-55.

TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE PARAMETERS OF THERMAL SCHEMES OF THERMAL POWER PLANTS WITH A HYDROGEN GENERATOR

MM. Sultanov, EV. Kuryanova

Moscow Power Engineering Institute, Russia
ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-5982-8983>,
sultanov_mm@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To consider various variants of thermal schemes of power plants and to assess the main technical and economic parameters. The article presents the results of the development of schemes of electric power plants with a capacity of up to 100 kW with a steam-generating hydrogen-oxygen plant for modeling and selecting effective options for thermal schemes of microgeneration power plants at the stage of design and development of energy systems. *METHODS.* The analysis of the proposed variants of thermal schemes with a hydrogen-oxygen steam generator, including circuit solutions of micro-gas turbine installations with a hydrogen-oxygen steam generator, a scheme of a steam-gas installation with a hydrogen-oxygen steam generator and intermediate steam superheating, a scheme of a steam-turbine installation with a hydrogen-oxygen steam generator, a scheme of a steam-turbine installation with a hydrogen-oxygen steam generator and a single-stage intermediate steam superheating, is performed, the scheme of a steam turbine installation with a hydrogen-oxygen steam generator and an intermediate superheat of steam and a steam cooler. *RESULTS.* A variant of the thermal scheme is proposed, which will allow determining the approach to estimating the fuel component of the production cost of heat and electricity for domestic power plants. The article describes a chemical method for producing hydrogen under laboratory conditions in hydrogen generators based on the hydrolysis of a solid reagent-aluminum in a reaction vessel, in which the contact of aluminum particles occurs in the liquid phase of an aqueous solution of caustic soda. A feature of the proposed method is the possibility of regulating the flow rates in the supply lines of an aqueous suspension of aluminum and an aqueous solution of caustic soda, which can significantly improve the quality of regulation and reduce the cost of operating such systems. To a large extent, the creation of such systems becomes possible if there is a demand for the generated electrical energy, which determines the need to ensure high values of technical and economic indicators of the operation of power plants. *CONCLUSION.* Calculated estimates have shown that the specific consumption of conventional fuel for the production of electric energy by microgeneration systems based on gas turbine units with a hydrogen generator with a capacity of 5-100 kW ranges from 0.098 to 0.117 kg/kWh.

Keywords: microgeneration plants, micro GTU, efficiency, use of hydrogen, steam generating hydrogen-oxygen plant.

Acknowledgments: The research is funded by Russian Federation public contract FSWF -2020-0025 «Technique development and method analysis for ensuring power system object security and competitiveness based on the digital technologies».

For citation: Sultanov MM, Kuryanova EV. Research of the application of hydrogen as a fuel to improve energy and environmental performance of gas turbine plants. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(2): 46-55. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2- 46-55.

Введение

В настоящее время российская энергетика переживает технологические изменения, позволяющие осуществить переход к совершенно новому уровню развития. Одним из динамически развивающихся за последнее десятилетие направлений является распределённая генерация [1-3].

Согласно Федеральному закону от 23.03.2003 № 35 «Об электроэнергетике» под объектом микрогенерации понимается объект, предназначенный для производства электроэнергии, энергетические устройства которого присоединены к объектам электроэнергетической системы с уровнем напряжения до 1000 В, функционирующие в целях удовлетворения собственных нужд. Технологическое присоединение объектов малой мощности должно обеспечивать выдачу электроэнергии в сеть с максимальной мощностью,

которая не превышает величину максимальной мощности принимающих устройств потребителя электроэнергии и составляющей не более 15 кВт.

К основным объектам распределенной генерации относят объекты генерации мощностью до 25 МВт, объекты когенерации, системы на основе возобновляемых источников энергии, системы хранения электроэнергии, технологии Микрогрид. Развитие малой генерации происходит и за счет строительства объектов с применением газотурбинных и газопоршневых установок, а снижение затрат происходит за счет использования недорогих видов топлива [1].

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2035 года одной из задач развития энергетики - является интеллектуализация электроэнергетической системы, в том числе, за счёт внедрения объектов распределенной генерации за счет риск-ориентированного управления на базе цифровых технологий [1].

Таким образом, актуальной становится задача разработки эффективной, надежной и экологически безопасной микроэнергетической установки и внедрение ее в энергетическую систему России, разработки технологии автономного производства водорода и кислорода, водородо-кислородной парогенерации, требующей минимальных капитальных затрат на реконструкцию парогенераторного и турбогенераторного оборудования [1-9].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ схем получения водорода в водородном генераторе за счет гидролиза твердого реагента – алюминия.
2. Разработать методику расчета себестоимости получения водорода за счет гидролиза твердого реагента – алюминия – в водородном генераторе.
3. Разработать схемы тепловой паротурбинной электростанции с парогенерирующей водородно-кислородной установкой.
4. Провести анализ предложенных вариантов тепловых схем микроГТУ мощностью до 100 кВт с водородно-кислородным генератором.

Строительство и ввод новых объектов микрогенерации выйдет на высокий уровень после осознания выгоды их применения. Анализ показал, что конкурентные преимущества можно выделить: в экономике (возможность ограничить рост цен на электрическую энергию); в экологии (сокращение вредных выбросов, предотвращение изменения климата); в управлении (развитие новых технологий).

Технологии микрогенерации могут включать различные источники электрической и тепловой энергии (солнечные электрические станции, ветроэлектростанции, дизельные генераторные установки, включая применение альтернативных видов топлива, в том числе водород, а также газотурбинные и газопоршневые установки).

Наиболее значимыми факторами для принятия решения о строительстве собственной микрогенерации являются:

- отсутствие затрат на передачу энергии потребителю;
- возможность изменять объемы производства тепловой и электрической энергии;
- использование в качестве топлива побочных продуктов производства;
- использование в производстве местных энергетических ресурсов.

Основными препятствиями выхода технологий малой генерации на рынок является отсутствие нормативно-правовой базы и стандартов для технологического присоединения к сети; процедуры сертификации оборудования, используемого для подключения; отсутствие регулируемых стимулов и тарифов для подключения.

Процесс реформирования сопровождается цифровизацией энергетики, в связи с этим необходимо создание цифровой системы, сочетающая процессы сбора, обработки, передачи цифровой информации; создание новых моделей эффективных рынков энергии и мощности. В связи с этим распределенные источники энергии могут стать альтернативой централизованному энергоснабжению [2-6].

При традиционных централизованных схемах электроснабжения потребителей электрическая энергия транспортируется по воздушным линиям электропередач от подстанций районных электрических сетей. Источниками энергии являются тепловые (ТЭС) и атомные электрические станции (АЭС), гидравлические электростанции (ГЭС), ветряные (ВЭС) и солнечные электрогенераторы (СЭС). В обобщенной структуре выработки электрической энергии в России на долю ТЭС приходится 63,70%, АЭС вырабатывает 19,25%, ГЭС обеспечивает производство 16,98% от общего количества электрической энергии. По данным ОАО «СО ЕЭС» в 2019 году в России было выработано 1070,9 млрд. кВт·ч электрической энергии. На долю СЭС приходится 0,22%, вклад ВЭС составляет 0,06% от общей установленной мощности электрических станций страны, при этом их установленная мощность составляет 535,1 и 145,9 МВт, соответственно. Важно

заклучить, что электрическая мощность распределенных источников энергии в России равна 24 ГВт (примерно 9% от всей установленной мощности энергосистемы). Дальнейшее увеличение количества и мощности вновь вводимых микрогенерирующих установок и их участие в единой энергосистеме необходимо проводить для повышения конкуренции на рынке электрической энергии и мощности, за счет применения в распределенной генерации более дешевого альтернативного топлива, а также формирования с непосредственным их участием локальных интеллектуальных энергосистем [10-15].

Необходимо отметить, что при расчете себестоимости выработки электрической энергии на базе микрогенерационных установок, необходимо учитывать затраты на топливо, составляющую капитальных затрат себестоимости электрической энергии, а также эксплуатационные расходы. Отметим, что при определении частного вклада вышеприведенных составляющих себестоимости электрической энергии на топливную составляющую приходится порядка 30–39 %, составляющая капитальных затрат себестоимости равна 20–36 %, эксплуатационные расходы составляют около 34–41 %. Рассмотрим вариант, в котором для различного состава импортных микрогенерационных газотурбинных установок себестоимость производства электрической энергии составила: 2ГТУ × 30кВт–4,69 рубля/кВт·ч, 1ГТУ × 65кВт–8,21 рублей/кВт·ч. В ходе предварительных расчетных оценок было установлено, что на себестоимость электрической энергии в большей степени влияют эксплуатационные расходы, связанные с техническим обслуживанием установок, выполняемым, как правило, заводом-изготовителем. При работе рассмотренных газотурбинных установок топливная составляющая себестоимости электрической энергии может быть значительно уменьшена за счет применения альтернативных видов сжигаемого топлива (например, конверторный газ, водород, синтез-газ) [7-9].

Методы

Описание схем микрогенерационных газотурбинных установок и способа получения водорода

В последнее время одним из актуальных вопросов в энергетике является использование более эффективных технологий производства энергии. Одним из таких направлений является создание водородных минипарогенераторов малой мощности (до 200 кВт) и внедрение их в тепловые схемы электростанции.

Разработана схема тепловой паротурбинной электростанции с парогенерирующей водородно-кислородной установкой. Данная схема содержит парогенерирующую водородно-кислородную установку, в которую подается вода, а также водород от водородной установки гидролиза твердого реагента – алюминия в реакционном сосуде и кислород от кислородной установки. Вырабатывается пар, который поступает в турбину и далее схема работает по принципу обычной тепловой электростанции. В качестве резервной установки для получения водорода и кислорода предусмотрена электролизёрная установка. В схеме предусмотрена электрохимическая установка на топливных элементах, которая используется в качестве аварийной системы энергоснабжения и для обеспечения собственных нужд станции [17].

Предлагаемый вариант тепловой схемы позволит определить подход к оценке топливной составляющей себестоимости производства тепловой и электрической энергии для отечественных электростанций.

Одним из преимуществ рассматриваемой схемы является то, что водород и кислород производится в отдельной водородной установке непрерывного действия гидролиза твердого реагента – алюминия в реакционном сосуде и кислородной установке, а не подводится из стационарных хранилищ, являющиеся объектами повышенной опасности.

Для уменьшения затрат на топливо и развития новых технологий получения альтернативных энергетических ресурсов в настоящее время в сфере автономной распределенной энергетики разрабатываются проекты генераторов получения водорода, преимущественно электрохимического типа, для использования как в стационарных установках, на транспорте, так и в системах заправки и восполнения потерь водорода в системах охлаждения электрических генераторов.

Обзор существующих разработок по алюмоводородному направлению показал, что активно патентуются технологии по использованию продуктов гидролиза в качестве ценного вторичного сырья в промышленности. Наибольший технический интерес представляют такие технологии для автономных энергетических систем.

В связи с этим, авторами разработаны способ производства и моделирования процессов в химических реакторах, а также тепловые схемы микрогенерационных

газотурбинных установок с применением водородного генератора, как показано на рисунках 1 – 4.

Моделирование процессов получения водорода за счет гидролиза твердого реагента – алюминия в реакционном сосуде может быть использовано для оптимизации массообмена и гидродинамических процессов в альтернативных вариантах проектируемых генераторов водорода. Контактное взаимодействие веществ-имитаторов происходит в реальном или модельном реакторе. Твердую фазу – частицы алюминия моделируют частицами пищевой соды, а жидкую фазу – водный раствор едкого натра моделируют водным раствором уксусной кислоты; газообразный продукт гидролиза – водород - моделируют углекислым газом. Предлагаемый способ моделирования не требует проведения процесса при высоких температурах и с использованием взрывоопасных веществ, поэтому обладает рядом преимуществ по сравнению с известными способами: простотой, безопасностью, экономичностью [4, 16-19].

В генераторах водорода на основе гидролиза твердого реагента – алюминия – в реакционном сосуде контактирование частиц алюминия происходит в жидкой фазе водного раствора едкого натра. Регулирование выхода водорода основано на том, что используется реактор непрерывного действия, когда процесс получения водорода можно регулировать по расходам в магистралях подачи водной суспензии алюминия и водного раствора едкого натра, что позволяет улучшить качество регулирования и снизить затраты на эксплуатацию.

Реализация алюмината может принести дополнительный доход, снизив себестоимость производимого водорода. Стоимость водорода, производимого генератором, складывается из цены на воду, катализаторы, электроэнергию на перекачивание реагентов. Анализ проведенного расчета себестоимости водорода (порядка 4,91 руб/м³) за счет твердого реагента - гидролиза алюминия показал высокую эффективность применения таких технологий [16].

Использование разработанного варианта генератора и способа получения водорода позволит снизить затраты на топливную составляющую себестоимости производства электрической энергии, оценочно на 10-15 %, и будет способствовать развитию технологий микрогенерации на основе газотурбинных установок с использованием водородного топлива. В совокупности со снижением расходов на эксплуатацию предлагаемые технические решения позволят обеспечить себестоимость вырабатываемой электрической энергии микрогенерационными комплексами на базе газотурбинных установок на уровне 2,5-3 рубля/кВт·ч, и тем самым повысить их конкурентоспособность и спрос на розничном рынке электрической энергии и мощности.

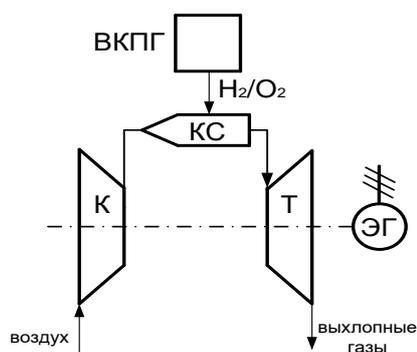


Рис. 1. Схема микрогенерационной газотурбинной установки с водородно-кислородным парогенератором К – компрессор, КС – камера сгорания, ВКПГ – водородно-кислородный парогенератор, Т – турбина, ЭГ – электрогенератор

Fig. 1. Diagram of a cogeneration gas turbine unit with a hydrogen-oxygen steam generator K-compressor, CS-combustion chamber, VKPG-hydrogen-oxygen steam generator, T-turbine, EG-electric generator

В камеру сгорания газотурбинной установки подается воздух, нагнетаемый компрессором, и отдельно поступает кислород. Образующиеся в камере сгорания высокотемпературные газы совершают работу на рабочих ступенях турбины. Выхлопные газы от газотурбинной установки для повышения экономичности процесса когенерации направляются на утилизацию [4, 9].

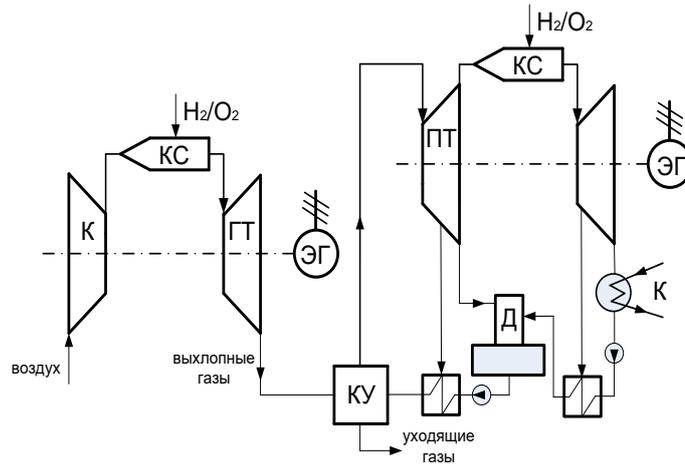


Рис. 2. Тепловая схема ПГУ с водородно-кислородным парогенератором и промежуточным перегревом пара К – компрессор, ГТ – газовая турбина, ЭГ – электрогенератор, КУ – котел-утилизатор, ПТ – паровая турбина, КС – камера сгорания, Д – деаэрактор

Fig. 2. Thermal diagram of a CCGT with a hydrogen-oxygen steam generator and an intermediate superheat of steam K-compressor, GT-gas turbine, EG-electric generator, KU-heat recovery boiler, PT-steam turbine, CS-combustion chamber, D-deaerator

Выхлопные газы газотурбинной установки направляются в котел-утилизатор, в котором значительная часть теплоты передается пароводяному рабочему телу. Сгенерированный пар поступает в турбину, где дополнительно используется водородный перегрев пара для эффективности работы микрогенерационной установки.

Разработаны тепловые схемы паротурбинных установок (ПТУ) с водородно-кислородными парогенераторами, представленные на (рис.3) и (рис.4).

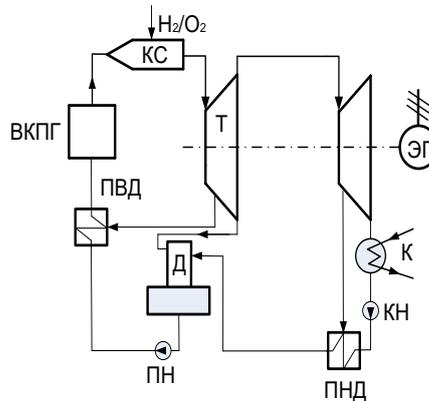


Рис. 3. Тепловая схема ПТУ с водородно-кислородным парогенератором ВКПГ – водородно-кислородный парогенератор, КС – камера сгорания, Т – турбина, ЭГ – электрогенератор, К – конденсатор, КН – конденсатный насос, ПНД – подогреватель низкого давления, Д – деаэрактор, ПН – питательный насос, ПВД – подогреватель высокого давления

Fig. 3. Thermal scheme of a PTU with a hydrogen-oxygen steam generator VKPG – hydrogen-oxygen steam generator, CS-combustion chamber, T-turbine, EG-electric generator, K-condenser, KN-condensate pump, HDPE-low pressure heater, D-deaerator, PN-feed pump, LDPE-high pressure heater

В предложенной схеме между водородно-кислородным парогенератором и турбиной установлена камера сгорания для дополнительного перегрева пара на входе в турбину. Далее пар, совершив работу в проточной части турбины конденсируется и конденсатным насосом прокачивается через ПНД, деаэрактор и ПВД.

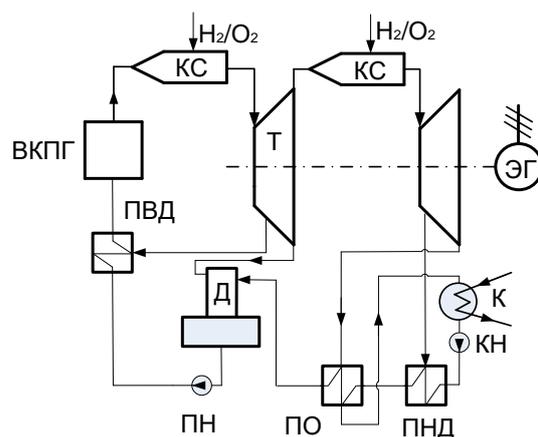


Рис. 4. Тепловая схема ПТУ с водородно-кислородным парогенератором и двухступенчатым промежуточным перегревом пара и пароохладителем ВКПГ – водородно-кислородный парогенератор, КС – камера сгорания, Т – турбина, ЭГ – электрогенератор, К – конденсатор, КН – конденсатный насос, ПНД – подогреватель низкого давления, Д – деаэрактор, ПН – питательный насос, ПВД – подогреватель высокого давления, ПО – пароохладитель

Fig. 4. Thermal scheme of a PTU with a hydrogen-oxygen steam generator and a two-stage intermediate superheating of steam and a steam cooler VKPG – hydrogen-oxygen steam generator, CS-combustion chamber, T-turbine, EG-electric generator, K-condenser, KN-condensate pump, HDPE-low-pressure heater, D-deaerator, PN-feed pump, LDPE-high-pressure heater, PO-steam cooler

Для повышения тепловой экономичности в данной схеме двухступенчатый перегрев пара, а также установлен пароохладитель для дополнительного подогрева конденсата отработанным паром турбоустановки.

Обсуждение результатов

В работе выполнен поверочный термогазодинамический расчет схемы микрогенерационной газотурбинной установки с водородно-кислородным генератором (рис.1). В качестве исходных данных задавались параметры окружающей среды (давление и температура воздуха (101325 Па и 15°C, соответственно)), также учитывались характеристики теплоты сжигания водорода, КПД камеры сгорания газотурбинной установки принимался на уровне 0,99, В результаты теплового расчета микроГТУ в зависимости от температуры газов перед турбиной получены следующие технико-экономические показатели, представленные на рисунках 5 и 6.

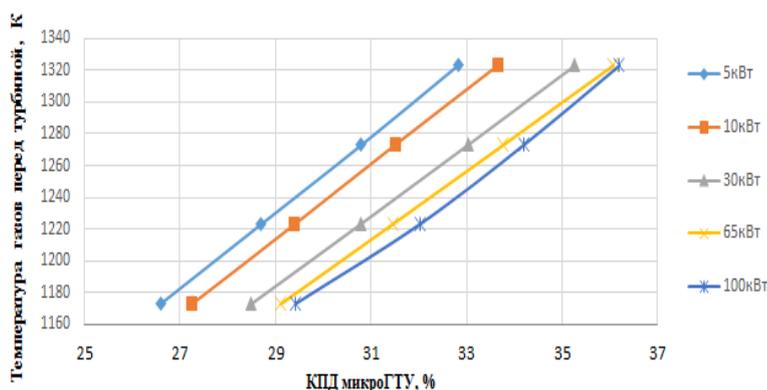


Рис. 5. Зависимость изменения КПД микроГТУ от температуры газов перед турбиной для установок различной электрической мощности

Fig. 5. Dependence of the change in the efficiency of micro-GTU on the temperature of the gases in front of the turbine for installations of different electrical power

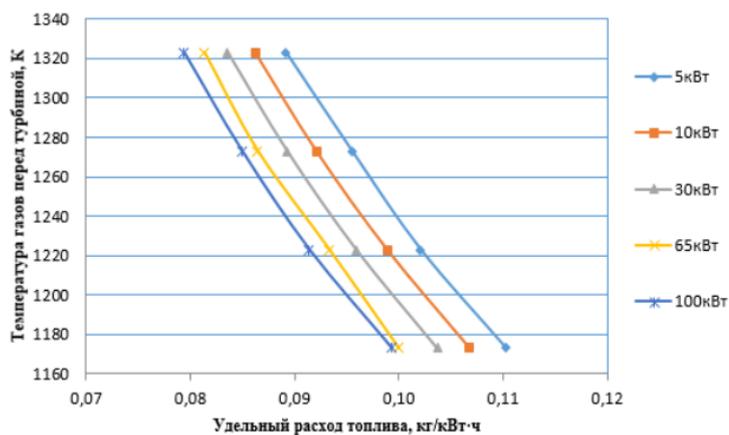


Рис. 6. Зависимость изменения удельного расхода топлива от температуры газов перед турбиной для микроГТУ различной электрической мощности

Fig. 6. Dependence of the change in the specific fuel consumption on the temperature of the gases in front of the turbine for micro GTU of different electrical power

Приведенные на рисунках 5 и 6 результаты расчетов представлены для модельного ряда (ВКПГ-5, ВКПГ-10, ВКПГ-30, ВКПГ-65, ВКПГ-100) микрогенерационных установок с водородным генератором от 5 до 100 кВт с учетом климатических условий их работы. Таким образом, расчетные оценки показали, что удельный расход условного топлива на производство электрической энергии микрогенерационными системами на основе ГТУ с водородно-кислородным генератором мощностью 5 – 100 кВт при номинальном режиме работы составляет от 0,098 до 0,117 кг/кВт·ч. При этом электрический КПД микроГТУ изменяется в диапазоне от 26,5 до 36,2 % при температуре газов перед турбиной, равной 1170К.

Выводы

Разработанные варианты тепловых схем микрогенерационных установок могут быть использованы при обосновании на стадии проектирования тепловых электрических станций мощностью до 100 кВт, включающие схемные решения микроГТУ с водородно-кислородным парогенератором, схему ПГУ с водородно-кислородным парогенератором и промежуточным перегревом пара, схему ПТУ с водородно-кислородным парогенератором, схему ПТУ с водородно-кислородным парогенератором и одноступенчатым промежуточным перегревом пара, схему ПТУ с водородно-кислородным парогенератором и промежуточным перегревом пара и пароохладителем. КПД по производству электрической энергии приведенных тепловых схем составляет 31–34,5 % при температуре газов перед турбиной, равной 1270К. Удельный расход топлива на производство электрической энергии составляет 0,098–0,117 кг/кВт·ч в зависимости от типа модельной установки.

Выполнен детальный анализ схемы получения водорода за счет гидролиза твердого реагента – алюминия – в водородном генераторе. Показано, что регулирование выхода водорода основано на том, что используется реактор непрерывного действия, когда процесс получения водорода можно регулировать по расходам в магистралях подачи водной суспензии алюминия и водного раствора едкого натра, что позволяет улучшить качество регулирования и снизить затраты на производство водорода и эксплуатацию энергетических установок.

Предлагаемые технические решения по тепловым схемам энергетических установок микрогенерации (до 100 кВт) могут быть использованы при обосновании и выборе вариантов энергоснабжения потребителей в системах распределенной энергетики.

Литература

1. Филиппов С.П., Дильман О.Д., Илюшин П.В. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 4-17.
2. Головицкий В.О. Готова ли электроэнергетика России к переходу на новую технологическую платформу, основанную на массовой цифровизации? // Энергетик. 2018. № 11. С. 3-6.
3. Веселов Ф.В., Макаров А.А., Макарова А.С. Методы и результаты оценки эффективности ускоренной модернизации электроэнергетики России // Теплоэнергетика. 2013. № 1. С. 6-15.

4. Султанов М.М., Курьянов В.Н., Терентьев Г.Ф. и др. Способ моделирования процессов в химических реакторах. Патент РФ на изобретение № 2018105753. 19.03.2019. Бюл. №8 Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37358470>. Ссылка активна на 29 марта 2021.
5. Малышенко С.Л., Счастливцев А.И. Термодинамическая эффективность геотермальных станций с водородным перегревом пара // Теплоэнергетика. 2010. №11. С. 23-27.
6. Безуглов Р.В. Микротурбинная установка для эффективного энергоснабжения автономных индивидуальных потребителей // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2013. № 1. С. 51–55.
7. Беккер В.Л. Расчет различных вариантов тепло- и электроснабжения промышленных объектов на базе когенерационной мини-ТЭЦ // Вестник МГСУ. 2008. № 3. С. 64-69.
8. Коробицин Н.А., Салмин В.В. Расчет основным энергетических показателей работы ГТУ в составе мини-ТЭЦ котельной // Энергетика Татарстана. 2009. № 1. С. 15-18.
9. Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Головкин Н.Н. Экологическая и экономическая оценка использования мини-ТЭЦ, работающих на природном и биогазе // Международный журнал экспериментального образования. 2014. №1. С. 86-92.
10. Gholinejad H., Loni A., Adabi J., et.al. A hierarchical energy management system for multiple home energy hubs in neighborhood grids // Journal of Building Engineering. 2019. V. 28. pp.101028.
11. Ganjehloua H.G., Niaeia H., Jafaria A., et.al. Anoveltechno-economicmulti-leveloptimizationinhome-microgridswith coalition formation capability // Sustainable Citiesand Society. 2020. V.60. pp.1-19.
12. Monfared H. J., Ghasemi A., Loni A., et.al A hybrid price-based demand response program for the residential micro-grid // Energy. 2019. V.185. pp. 274 -285.
13. Nazari-Heris M., Mirzaei M., Mohammadi-Ivatloo B., et.al. Economic-environmental effect of power to gas technology in coupled electricity and gas systems with price-responsive // Journal of Cleaner Production. 2020. V. 244. pp.1-12.
14. Jadidbonab M., Mohammadi-Ivatloo B., Short-Term Self-Scheduling of Virtual Energy Hub Plant Within Thermal Energy Market / IEEE Transactions on industrial electronics. 2021. V. 68(4).
15. Sultanov M.M., Konstantinov A.A., Ivanitckii M.S. Environmental aspects of thermal power equipment operation modes optimization// International Journal of Hydrogen Energy. 2017. V. 42. № 18. P. 13300 -13306.
16. Султанов М.М., Терентьев Г.Ф., Кузеванов В.С., и др. Способ получения водорода за счет гидролиза твердого реагента-алюминия в реакционном сосуде. Патент РФ на изобретение. №2013150927/05. 27.03.2015. Бюл. № 9. <https://patents.google.com/patent/RU2545290C1/ru>. Ссылка активна на 27.03.2015.
17. Роголёв Н.Д., Султанов М.М., Терентьев Г.Ф., и др. Тепловая паротурбинная электростанция с парогенерирующей водородно-кислородной установкой. Патент РФ на изобретение. №2018126592. 25.12.2019. Бюл. № 36. <https://patents.google.com/patent/RU2545290C1/ru>. Ссылка активна на 29.03.2021.
18. Mutlu R.N., Gizir A.M., Kucukkara I. Hydrogen generation by electrolysis under subcritical water condition and the effect of aluminium anode. International Journal of Hydrogen Energy. 2020. V. 45. № 23. pp. 12641-12652.
19. Sevastyanova L.G., Klyamkin S.N., Bulychev B.M. Generation of hydrogen from magnesium hydride oxidation in water in presence of halides. International Journal of Hydrogen Energy. 2020. V. 45. № 4. pp. 3046-3052.

Авторы публикации

Султанов Махсуд Мансурович – канд. техн. наук, доцент, руководитель Научно-исследовательской лаборатории Цифровых технологий филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском.

Курьянова Елена Викторовна – старший преподаватель, филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском.

References

1. Filippov SP, Dil'man OD, Plyushin PV. Raspredeleonnaya generatsiya i ustoichivoe razvitie regionov. *Teploenergetika*. 2019;12:4-17.
2. Golovshchikov VO. Gotova li elektroenergetika Rossii k perekhodu na novuyu tekhnologicheskuyu platformu, osnovannuyu na massovoi tsifrovizatsii? *Energetik*. 2018;11: 3-6.
3. Veselov FV, Makarov AA, Makarova AS. Metody i rezul'taty otsenki effektivnosti uskorennoi modernizatsii elektroenergetiki Rossii Normativno-pravovoe i metodicheskoe

obespechenie perekhoda na nailuchshie dostupnyye tekhnologii v teploenergetike. *Teploenergetika*. 2013;1:6-15.

4. Sultanov MM, Kur'yanov VN, Terent'ev GF, et al. *Sposob modelirovaniya protsessov v khimicheskikh reaktorakh*. Patent RUS №2018105753. 19.03.2019. Byul. № 8. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37358470>. Accessed: 29 martha 2021.

5. Malysenko SL, Schastlivtsev AI. Termodinamicheskaya effektivnost' geotermal'nykh stantsii s vodorodnym peregrevom para. *Teploenergetika*. 2010;11:23-27.

6. Bezuglov RV. Mikroturbinnaya ustanovka dlya effektivnogo energosnabzheniya avtonomnykh individual'nykh potrebitelei. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheski nauki*. 2013;1:51–55.

7. Bekker VL. Raschet razlichnykh variantov teplo- i elektrosnabzheniya promyshlennykh ob"ektov na baze kogeneratsionnoi mini-TETs. *Vestnik MGSU*. 2008;3:64–69.

8. Korobitsin NA, Salmin V.V. Raschet osnovnym energeticheskikh pokazatelei raboty GTU v sostave mini-TETs kotel'noi. *Energetika Tatarstana*. 2009;1:15-18.

9. Masleeva OV, Pachurin GV, Golovkin NN. Ekologicheskaya i ekonomicheskaya otsenka ispol'zovaniya mini-TETs, rabotayushchikh na prirodnom i biogaze. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2014;1:86-92.

10. Gholinejad H, Loni A, Adabi J, et.al. A hierarchical energy management system for multiple home energy hubs in neighborhood grids. *Journal of Building Engineering*. 2019;28:101028.

11. Ganjehloua HG, Niaeia H, Jafaria A, et.al. Anoveltechno-economicmulti-leveloptimizationinhome-microgridswith coalition formation capability. *SustainableCitiesandSociety*. 2020;60:1-19.

12. Monfared HJ, Ghasemi A, Loni A, et.al A hybrid price-based demand response program for the residential micro-grid. *Energy*.(2019);185:274-285.

13. Nazari-Heris M, Mirzaei M, Mohammadi-Ivatloo B, et.al. Economic-environmental effect of power to gas technology in coupled electricity and gas systems with price-responsive. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 244:1-12.

14. Jadidbonab M, Mohammadi-Ivatloo B, Short-Term Self-Scheduling of Virtual Energy Hub Plant Within Thermal Energy Market. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2021;68(4).

15. Sultanov MM, Konstantinov AA, Ivanitckii MS. Environmental aspects of thermal power equipment operation modes optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(18):13300 -13306.

16. Sultanov MM, Terent'ev GF, Kuzevanov VS, et.al. Sposob polucheniya vodoroda za schet gidroliza tverdogo reagenta-alyuminiya v reaktsionnom sosude. Patent RF na izobretenie. №2013150927/05. 27.03.2015. Byul. № 9. <https://patents.google.com/patent/RU2545290C1/ru>. Accessed: 29 martha 2021

17. Rogalev ND, Sultanov MM, Terent'ev GF, et.al. Teplovaya paroturbinnaya elektrostantsiya s parogeneriruyushchei vodorodno-kislородnoi ustanovkoi. Patent RF na izobretenie. №2018126592. 25.12.2019. Byul. № 36. <https://patents.google.com/patent/RU2545290C1/ru>. Accessed: 29 martha 2021.

18. Mutlu RN, Gizir AM, Kucukkara I. Hydrogen generation by electrolysis under subcritical water condition and the effect of aluminium anode. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(23):12641-12652.

19. Sevastyanova LG, Klyamkin SN, Bulychev BM. Generation of hydrogen from magnesium hydride oxidation in water in presence of halides. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(4):3046-3052.

Author of the publication

Mahsud M. Sultanov – Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI).

Elena V. Kuryanova – Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI).

Получено

10 марта 2021г.

Отредактировано

24 марта 2021г.

Принято

06 апреля 2021г.