РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) 2 768 766 (13) C1

(51) МПК
G21D 1/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G21D 1/00 (2022.02)

(21)(22) Заявка: **2021112670, 29.04.2021**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.04.2021

Дата регистрации:
24.03.2022

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **29.04.2021**

(45) Опубликовано: **24.03.2022** Бюл. № **9**

Адрес для переписки:
410001, г. Саратов, ул. Ново-Астраханская, 37/43а, кв. 148, Байрамову Артему Николаевичу

(72) Автор(ы):
Байрамов Артём Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Байрамов Артём Николаевич (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2459293 C1, 20.08.2012. RU 2579849 C1, 10.04.2016 C1. RU 2537386 C1, 10.01.2015. SU 936734 A1, 07.09.1983. US 20100043435 A1, 25.02.2010. US 9006915 B1, 14.04.2015. Aminov R. Z. Assessment of the Performance of a Nuclear-Hydrogen Power Generation System / R. Z. Aminov, A. N. Bairamov, M. V. Garievskii // Thermal Engineering. 2019. N 3. Vol.66.** (см. прод.)

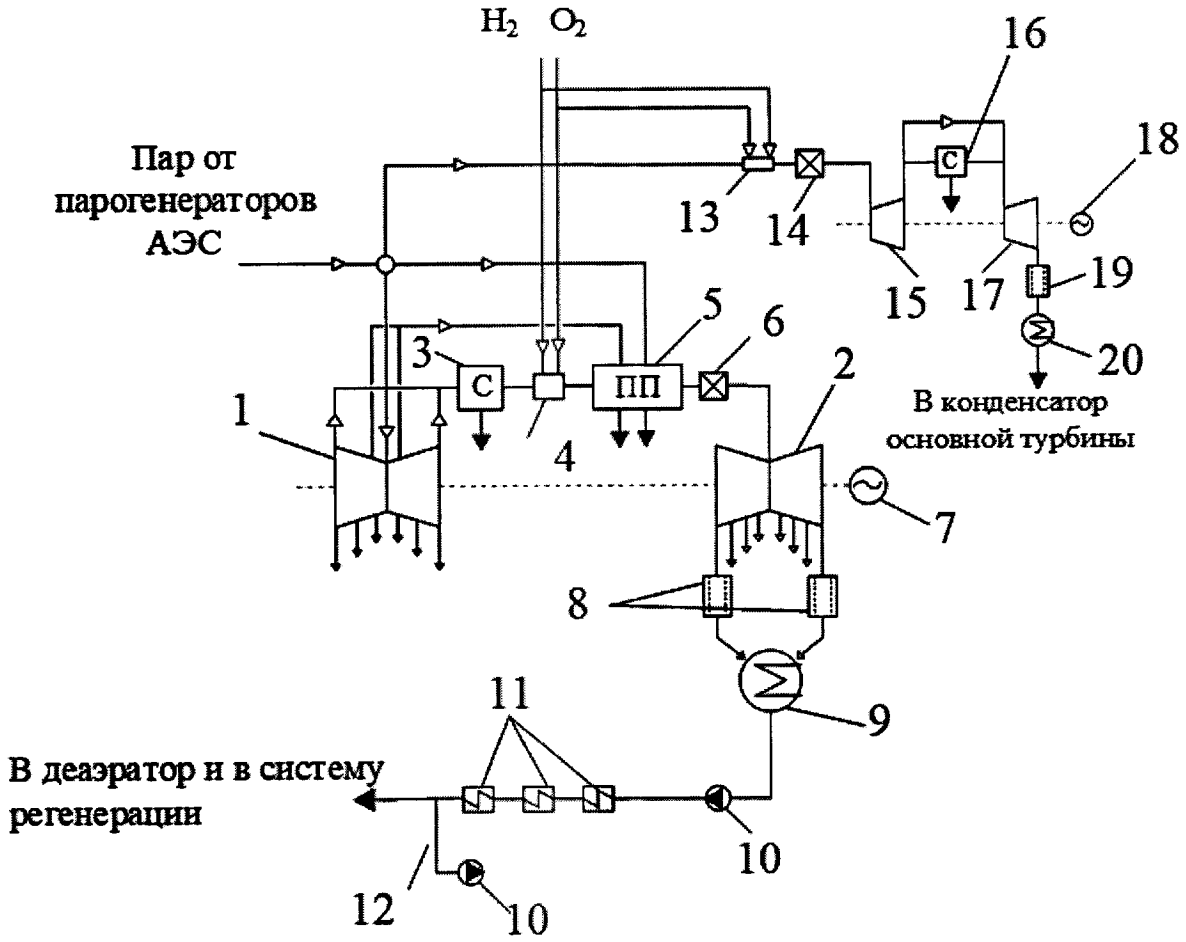
(54) ПАРОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА АЭС С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ И С СИСТЕМОЙ БЕЗОПАСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА

(57) Реферат:

Изобретение относится к паротурбинной установке АЭС. Паротурбинная установка АЭС с использованием дополнительной паровой турбины содержит систему сжигания водорода в кислороде с содержанием непрореагировавшего водорода и кислорода в паровой фазе рабочего тела под давлением. Установка содержит магнитный сепаратор, включающий соленоид, рабочий канал и основной трубопровод круглого сечения, во внутренней части которого установлена селективная мембрана на основе сплава палладия с серебром на участке воздействия магнитного поля на очищаемый поток водяного пара. Причем после водород-кислородной камеры сгорания перед цилиндром высокого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС и после промежуточного пароперегревателя перед цилиндром низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС установлены каталитические рекомбинаторы (дожигатели) непрореагировавшего водорода. В магнитном сепараторе обеспечивается дополнительное удаление непрореагировавшего водорода за счет его сорбции в мембране. Возможный оставшийся непрореагировавший кислород удаляется системой эжекторных насосов. Техническим результатом является практически полное удаление непрореагировавшего водорода при существенном снижении концентрации непрореагировавшего кислорода в рабочем теле паротурбинной установки АЭС с сохранением номинального рабочего ресурса рабочих лопаток основной турбины АЭС и дополнительной турбины. 1 ил.

RU 2768766 C1

RU 2768766 C1



Фиг. 1

(56) (продолжение):
pp.196-209. Bairamov A.N. Evaluation of the operating resource of the most loaded rotor element of the additional steam turbine with steam-hydrogen overheat of the working fluid at a nuclear power station // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol.891. 012252. P.1-9. Aminov R.Z., Bairamov A.N., Shatskova O. V. Assessment of the Efficiency of Hydrogen Cycles on the Basis of Off-Peak Electric Energy Produced at a Nuclear Power Station // Thermal Engineering. - 2009. - T.56. N 11 - P. 940 - 945.

RU 2768766 C1

RU 2768766 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 768 766**(13) **C1**

(51) Int. Cl.
G21D 1/00 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC
G21D 1/00 (2022.02)

(21)(22) Application: **2021112670, 29.04.2021**

(24) Effective date for property rights:
29.04.2021

Registration date:
24.03.2022

Priority:
(22) Date of filing: **29.04.2021**

(45) Date of publication: **24.03.2022** Bull. № **9**

Mail address:
410001, g. Saratov, ul. Novo-Astrakhanskaya, 37/43a, kv. 148, Bajramovu Artemu Nikolaevichu

(72) Inventor(s):
Bajramov Artem Nikolaevich (RU)

(73) Proprietor(s):
Bajramov Artem Nikolaevich (RU)

(54) STEAM TURBINE PLANT OF THE NPP WITH AN ADDITIONAL STEAM TURBINE AND WITH A SYSTEM FOR THE SAFE USE OF HYDROGEN

(57) Abstract:

FIELD: nuclear power industry.

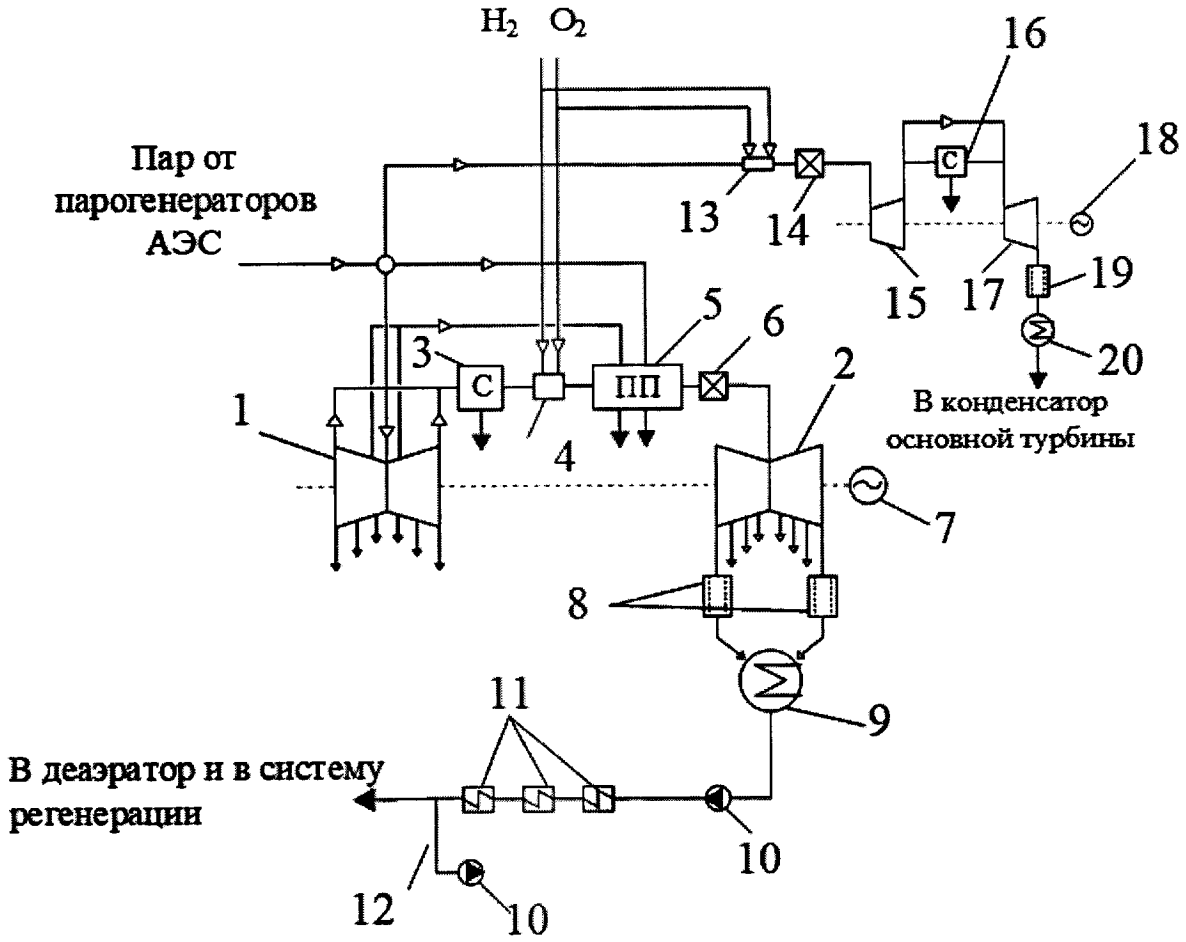
SUBSTANCE: invention relates to a steam turbine plant of a nuclear power plant. A steam turbine plant of a nuclear power plant using an additional steam turbine contains a system for burning hydrogen in oxygen with the content of unreacted hydrogen and oxygen in the vapor phase of the working fluid under pressure. The installation contains a magnetic separator, including a solenoid, a working channel and a main pipeline of circular cross-section, in the inner part of which a selective membrane based on an alloy of palladium with silver is installed at the site of the influence of a magnetic field on the purified water vapor stream. Moreover, after the hydrogen-oxygen combustion chamber in front of the high-pressure cylinder of the additional turbine of the steam turbine plant of the NPP and after the intermediate superheater in front of the low-pressure cylinder of the main turbine of the steam turbine plant of the NPP, catalytic recombiners (afterburners) of unreacted hydrogen are installed. The magnetic separator provides additional removal of unreacted hydrogen due to its sorption in the membrane. Any remaining unreacted oxygen is removed by the ejector pump system.

EFFECT: almost complete removal of unreacted hydrogen with a significant decrease in the concentration of unreacted oxygen in the working body of the steam turbine plant of the NPP while maintaining the nominal working life of the working blades of the main turbine of the NPP and the additional turbine.

1 cl, 1 dwg

RU 2768766 C1

RU 2768766 C1



Фиг. 1

RU 2768766 C1

RU 2768766 C1

Изобретение относится к области атомной энергетики и предназначено для использования на атомных электрических станциях (АЭС) работающие на влажном паре.

Известна парогазовая установка, содержащая подключенную к парогенератору паровую турбину насыщенного пара, между цилиндрами которой установлены сепаратор и паровой промежуточный пароперегреватель. Параллельно последнему включен газовый промежуточный пароперегреватель, сообщенный по греющей среде с выхлопным трактом газовой турбины. Газовая часть установки включает также компрессор, камеру нагрева и газовый подогреватель питательной воды паровой турбины, включенный в выхлопной тракт газовой турбины последовательно за пароперегревателем и соединенный с входом компрессора, т.е. газовая часть установки замкнута. Газовый подогреватель включен по питательной воде параллельно регенеративному подогревателю паровой турбины (остальные регенеративные подогреватели на чертеже не изображены). Установка снабжена системой получения и хранения водорода и кислорода, подключенной к камере нагрева, которая в свою очередь соединена с паровой турбиной (авт. свид. СССР на изобретение №1163681, МПК F01K 23/10, опубл. 15.12.1985 г.). Парогазовая установка предназначена для использования во время пиков электрической нагрузки в энергосистеме. Это осуществляется за счет того, что теплота от сжигания водорода с кислородом в камере нагрева подводится к рабочему телу газовой турбины, повышая его температуру и, тем самым, достигается большая выработка мощности. При этом нагрев рабочего тела осуществляется через разделяющую теплообменную поверхность. Отработавшее рабочее тело в газовой турбине отдает оставшуюся теплоту пару паротурбинной установки при промежуточном перегреве, вытесняя, тем самым, весь пар, предназначенный для осуществления промежуточного перегрева и, который, срабатывает в паровой турбине, повышая мощность паротурбинной установки.

Недостатком известной парогазовой установки является образование непрореагировавшего водорода после сжигания в среде кислорода в потоке рабочего тела газотурбинной установки, что при соединении с непрореагировавшим кислородом приведет к образованию гремучей смеси. Также недостатком является наличие громоздкой теплопередающей поверхности, а также необходимость использования принудительного внешнего охлаждения камеры нагрева, где происходит образование высокотемпературного пара при окислении водорода кислородом специальной охлаждающей водой, что связано со значительным количеством отводимой теплоты, необходимой для изменения ее фазового состояния и сопряжено с образованием солевых отложений в тракте охлаждения, что со временем становится причиной неработоспособного состояния паро-водородного нагревателя. Все это снижает безопасность и эффективность использования водорода в цикле парогазовой установки.

Известна принципиальная схема двухконтурной АЭС с паро-водородным перегревом пара на параллельно подключенной к основной (сателлитной) турбоустановке (в статье Малышенко С.П., Назарова О.В., Сарумов Ю.А. Некоторые термодинамические и технико-экономические аспекты применения водорода как энергоносителя в энергетике // Атомно-водородная энергетика и технология. - М.: Энергоатомиздат. - 1986. - Вып. 7. - С. 116-117). Схема предназначена для достижения маневренности энергоблока АЭС. На сателлитную турбоустановку подается часть основного пара путем его разделения перед цилиндром высокого давления основной турбины АЭС. При входе в сателлитную турбоустановку осуществляется паро-водородный перегрев пара. При всех нагрузках тепловая мощность реактора и расход пара поддерживаются постоянными, так что

открытие дроссельных клапанов, установленных на линии подачи пара в основную и сателлитную турбины приводит к изменению расхода пара через турбины, а значит, к изменению общей мощности турбоагрегатов. Увеличение расхода пара через сателлитную турбину при одновременном снижении его через основную турбину сопровождается ростом общей мощности энергоустановки, благодаря чему становится возможным плавное регулирование мощности и покрытие графика электрической нагрузки. Таким образом, достигается регулирование мощности энергоблока АЭС.

Недостатком известной принципиальной схемы является образование непрореагировавшего водорода после сжигания в среде кислорода в потоке рабочего тела сателлитной паровой турбины, что при соединении с непрореагировавшим кислородом приведет к образованию гремучей смеси. Также недостатком является менее эффективное использование теплоты высокотемпературных продуктов сгорания водорода в кислороде вследствие применения принудительного наружного охлаждения камеры сгорания, что связано со значительным количеством отводимой теплоты, необходимой для изменения фазового состояния охлаждающей воды, что снижает эффективность использования подведенной теплоты водорода. Также недостатком является образование солевых отложений в тракте внешнего охлаждения камеры сгорания охлаждающей водой, что со временем становится причиной неработоспособного состояния паро-водородного перегревателя. Таким образом, это снижает безопасность и эффективность повышения мощности энергоблока АЭС.

Известна турбинная установка АЭС (авт. свид. СССР на изобретение №936734, МПК G21D 1/00, опубл. 07.09.1983 г.), содержащая паровую турбину с цилиндром высокого давления (ЦВД) и цилиндром низкого давления (ЦНД), сепаратор, промежуточный перегреватель, систему для получения водорода и кислорода, включающую электролизную установку для получения водорода и водородные ресиверы, паро-водородный перегреватель, регенеративный подогреватель, установленный на трубопроводе питательной воды, водородный водонагреватель, задвижки и обратный клапан. При этом выход ЦВД через сепаратор и промежуточный перегреватель соединен с входом ЦНД, регенеративный подогреватель установлен на трубопроводе питательной воды и соединен с отбором пара от ЦВД и сепаратора, водородный пароперегреватель соединен с системой для получения водорода и кислорода, паро-водородный водонагреватель подключен по питательной воде через задвижку параллельно регенеративному подогревателю и к системе для получения водорода и кислорода, паро-водородный перегреватель подключен через задвижки параллельно промежуточному перегревателю.

Турбинная установка позволяет увеличить мощность энергоблока АЭС в пиковые часы электрической нагрузки в энергосистеме. Это достигается за счет того, что промежуточный перегрев основного пара осуществляют в паро-водородном перегревателе, куда подается для сжигания водород. Вытесненный пар, предназначенный для осуществления промежуточного перегрева, срабатывает в основной турбине, повышая ее мощность.

Недостатком известной турбинной установки является образование непрореагировавшего водорода после сжигания в среде кислорода в потоке рабочего тела паро-водородного перегревателя, что при соединении с непрореагировавшим кислородом приведет к образованию гремучей смеси. Также недостатком является наличие громоздкой теплопередающей поверхности, а также необходимость использования принудительного внешнего охлаждения водород-кислородной камеры сгорания, установленной внутри водородного пароперегревателя, где происходит

образование высокотемпературного пара при окислении водорода кислородом специальной охлаждающей водой, что связано со значительным количеством отводимой теплоты, необходимой для изменения ее фазового состояния и сопряжено с образованием солевых отложений в тракте охлаждения, что со временем становится причиной неработоспособного состояния паро-водородного нагревателя. Все это снижает безопасность и эффективность использования водорода.

Известна гибридная атомная электростанция (патент РФ на изобретение №2537386, МПК G21D 5/14, G21D 5/16, опубл. 10.01.2015), содержащая ядерный реактор на тепловых нейтронах, реакторный парогенератор и паротурбинную установку, работающую на генератор, дополнительный ядерный реактор в качестве источника пароперегрева, подключенного к пароперегревателю по его греющей стороне. Вход пароперегревателя по нагреваемой стороне подключен к выходу парогенератора, а выход подключен к входу паротурбинной установки.

Гибридная АЭС предназначена для повышения эффективной мощности АЭС.

Недостатком известной гибридной АЭС является повышенная радиационная опасность в связи с применением дополнительного ядерного реактора с целью перегрева пара из парогенераторов. Это снижает безопасность использования гибридной АЭС.

Известен способ работы энергоблока АЭС с водородной надстройкой и высокотемпературными электролизерами (патент РФ на изобретение №2682723, МПК G21D 7/00, опубл. 21.03.2019 г), включающий турбину с электрогенератором и подключенным к ней конденсатором, цех химводоочистки, бак-хранилище воды, а также подключенные к электрогенератору, по крайней мере, один пусковой электролизер, по крайней мере, один высокотемпературный электролизер, по крайней мере, два компрессора (один для водорода и второй для кислорода и выполнены с 2-3 ступенями сжатия и после каждой ступени установлен охладитель), конденсатный насос, двухрежимный водород-кислородный парогенератор (ДВКП). При этом ДВКП связан посредством двух паропроводов с турбиной и двух водопроводов, один из которых связан с цехом химводоочистки, другой - с тепловой схемой АЭС через бак-хранилище, конденсатный насос и конденсатор. При этом пусковой электролизер связан с баком-хранилищем воды и/или с цехом химводоочистки, а также подключен посредством газопроводов водорода и кислорода к ДВКП. Высокотемпературный электролизер связан посредством паропровода с ДВКП и посредством газопроводов водорода и кислорода с ДВКП, а также через компрессоры водорода и кислорода с хранилищем водорода и кислорода, которое также подключено газопроводами водорода и кислорода к ДВКП.

АЭС с водородной надстройкой предназначена для повышения эффективности работы АЭС за счет снижения расхода электроэнергии на электролиз, повышение количества производимого водорода и кислорода, дополнительного повышения количества вырабатываемой электроэнергии в периоды максимума электрической нагрузки.

Недостатком известной схемы является образование непрореагировавшего водорода после сжигания в среде кислорода в потоке рабочего тела, что при соединении с непрореагировавшим кислородом приведет к образованию гремучей смеси. Также недостатком является необходимость использования принудительного внешнего охлаждения ДВКП, что связано со значительным количеством отводимой теплоты, необходимой для изменения ее фазового состояния и сопряжено с образованием солевых отложений в тракте охлаждения, что со временем становится причиной неработоспособного состояния паро-водородного нагревателя. Все это снижает

безопасность и эффективность использования водорода.

Известна парогазовая установка на базе АЭС (патент РФ на изобретение №2553725, МПК F01K 23/00, F24H 7/00, опубл. 20.06.2015), содержащая паровую турбину с цилиндрами высокого и низкого давления, соединенными между собой паропроводом с последовательно включенными в него сепаратором и двухступенчатым промежуточным паропаровым перегревателем, подогреватель высокого давления, газотурбинную установку, газопаровой подогреватель, подключенный по греющей стороне к тракту отработавших газов газовой турбины, а по нагреваемой - к паропроводу между цилиндрами паровой турбины параллельно второй ступени паропарового перегревателя, газоводяной подогреватель, подключенный по греющей стороне к тракту отработавших газов газовой турбины после газопарового подогревателя, а по нагреваемой - к трубопроводу питательной воды парового цикла и установленный параллельно подогревателю высокого давления, сателлитную турбину, дожигающее устройство, паровую электролизерную, хранилище кислорода, хранилище водорода, компрематор кислорода, компрематор водорода, водород-кислородный пароенератор.

Парогазовая установка предназначена для повышения коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) энергоблока АЭС и всего энергокомплекса в целом за счет более глубокой утилизации уходящих газов ГТУ и предусмотрения резервной системы утилизации тепла ГТУ при выделении для реакторной установки строго базового режима и при одновременном расширении регулировочного диапазона всей энергоустановки, а также повышение эксплуатационной гибкости и маневренности парогазовой установки на базе АЭС и ГТУ с глубокой и вариативной утилизацией отработавших газов ГТУ.

Недостатком известной парогазовой установки на базе АЭС является содержание некоторой минимальной доли непрореагировавшего водорода и кислорода в паре после системы контроля и дожигания перед подачей в сателлитную турбину. Это требует применение дополнительной системы удаления непрореагировавшего водорода из потока рабочего тела, иначе это приведет к образованию гремучей смеси в конденсаторе как сателлитной турбины, так и в конденсаторе, либо деаэраторе основной турбины. Также недостатком является необходимость использования принудительного внешнего охлаждения водород-кислородной камеры сгорания, что связано со значительным количеством отводимой теплоты, необходимой для изменения ее фазового состояния и сопряжено с образованием солевых отложений в тракте охлаждения, что со временем становится причиной ее неработоспособного состояния. Все это снижает безопасность и эффективность использования водорода.

Известен способ и принципиальная схема повышения маневренности и безопасности АЭС на основе теплового и химического аккумулирования (патент РФ на изобретение №2640409, МПК G21D 1/00, опубл. 09.01.2018 г), содержащая основную паротурбинную установку (ПТУ), парогенератор (ПГ), устройство парораспределения, причем устройство парораспределения соединено с входом в основную ПТУ и ПГ посредством паропроводов, систему регенерации, электролизную установку для получения водорода и кислорода, водородные и кислородные ресиверы, водород-кислородный парогенератор, дополнительную ПТУ, бак горячей воды (БГВ), бак холодной воды (БХВ), поверхностный теплообменник.

Сущность изобретения заключается в обеспечении надежного повышения маневренности и безопасности двухконтурной АЭС на основе теплового и химического аккумулирования внепиковой электроэнергии в виде водородного топлива и горячей

воды, которые могут использоваться для выработки пиковой электроэнергии и обеспечения резервного электроснабжения собственных нужд АЭС с использованием энергии остаточного тепловыделения реактора при полном обесточивании.

Недостатком известного способа является образование непрореагировавшего водорода после сжигания в среде кислорода в потоке рабочего тела пи подаче в дополнительную паровую турбину, что при соединении с непрореагировавшим кислородом приведет к образованию гремучей смеси. Также недостатком является коррозионный износ рабочих лопаток паровой турбины из-за непрореагировавшего кислорода в условиях повышенной температуры свежего пара в результате его перегрева. Также недостатком является значительные затраты тепла из-за фазового изменения подаваемой воды на охлаждение при сжигании водорода с кислородом. Все это снижает безопасность, эффективность использования водорода и рабочий ресурс рабочих лопаток дополнительной паровой турбины.

Известен способ повышения мощности двухконтурной АЭС за счет комбинирования с водородным циклом (патент РФ на изобретение №2707182, МПК G21D 5/16, опубл. 25.11.2019 г), при этом принципиальная схема содержит водород-кислородную камеру сгорания, тракт охлаждения продуктов сгорания, подогреватели высокого давления питательной воды, питательный насос.

Сущность изобретения заключается в повышении эффективности использования водородного топлива для повышения мощности и КПД АЭС за счет повышения параметров острого пара перед паровой турбиной и увеличенного расхода рабочего тела через ПГ и турбину вследствие дополнительного подогрева питательной воды после подогревателей высокого давления теплотой продуктов сгорания водорода в кислороде выше номинальной температуры, но не выше температуры кипения при данном давлении перед подачей в ПГ.

Недостатком известного способа является образование непрореагировавшего водорода после сжигания в среде кислорода в потоке рабочего тела при смешении высокотемпературных продуктов сгорания водорода в кислороде с питательной водой и со свежим паром, что при соединении с непрореагировавшим кислородом приведет к образованию гремучей смеси по тракту движения рабочего тела паротурбинной установки АЭС. Также недостатком является коррозионный износ рабочих лопаток паровой турбины из-за непрореагировавшего кислорода в условиях повышенной температуры свежего пара в результате его перегрева. Это снижает безопасность использования водорода и рабочий ресурс рабочих лопаток паровой турбины АЭС.

Известен способ водородного подогрева питательной воды на АЭС (патент РФ на изобретение №2709783, МПК G21D 5/00, F22B 1/26, F02C 3/30, F01K 3/18) содержащей водород-кислородную камеру сгорания, тракт охлаждения продуктов сгорания, подогреватели высокого давления питательной воды, питательный насос, компрессор, бак-аккумулятор, дополнительную паровую турбину.

Сущность изобретения заключается в повышении эффективности и надежности использования водородного топлива для повышения мощности АЭС за счет увеличения расхода рабочего тела через ПГ вследствие дополнительного подогрева питательной воды после подогревателей высокого давления выше номинальной температуры за счет тепла продуктов сгорания водорода в кислороде, но не выше температуры кипения при данном давлении перед подачей в ПГ.

Недостатком известного изобретения является образование непрореагировавшего водорода после сжигания в среде кислорода в потоке рабочего тела при подаче в дополнительную паровую турбину, что при соединении с непрореагировавшим

кислородом приведет к образованию гремучей смеси. Вместе с этим недостатком является коррозионный износ рабочих лопаток дополнительной паровой турбины из-за непрореагировавшего кислорода в условиях повышенной температуры свежего пара в результате его перегрева. Это снижает безопасность использования водорода и рабочий ресурс рабочих лопаток дополнительной паровой турбины.

Известен способ повышения маневренности АЭС (патент РФ на изобретение №2529508, МПК G21D 1/00, опубл. 27.09.2014), включающий паровую турбину с цилиндрами высокого и низкого давления, устройство парораспределения, сепаратор, промежуточный перегреватель, систему для получения водорода и кислорода, включающую электролизную установку для получения водорода и кислорода с водородными и кислородными ресиверами.

Сущность изобретения заключается в обеспечении надежного и безопасного повышения маневренности и экономичности двухконтурной АЭС посредством работы ПГУ и водородного комплекса, оборудование которых выведено за территорию площадки станции.

Недостатком известного изобретения является образование непрореагировавшего водорода после сжигания в среде кислорода в потоке рабочего тела при подаче в дополнительную паровую турбину, что при соединении с непрореагировавшим кислородом приведет к образованию гремучей смеси. Также недостатком является коррозионный износ рабочих лопаток дополнительной паровой турбины из-за непрореагировавшего кислорода в условиях повышенной температуры свежего пара в результате его перегрева. Также недостатком является значительные затраты тепла из-за фазового изменения подаваемой воды на охлаждение водород-кислородной камеры сгорания. Все это снижает безопасность, эффективность использования водорода и рабочий ресурс рабочих лопаток дополнительной паровой турбины.

Известен способ расхолаживания водоохлаждаемого реактора при полном обесточивании АЭС (патент РФ на изобретение №2499307, МПК G21D 3/08, опубл. 20.11.2013 г), содержащий паропроизводящую установку с ядерным энергетическим водоохлаждаемым реактором, пароэнергетическую турбогенераторную установку, дополнительную паровую турбину, систему производства и хранения водорода и кислорода, систему расхолаживания паропроизводящей установки.

Способ предназначен для расхолаживания водоохлаждаемого реактора в штатном режиме при полном обесточивании АЭС, без использования аварийных систем расхолаживания реактора, за счет использования энергии остаточных тепловыделений в активной зоне, энергии сжигания водородного топлива и дополнительной турбины, эффективно используемой для повышения маневренности энергоблока АЭС в эксплуатационных режимах.

Недостатком известного способа является образование непрореагировавшего водорода после сжигания в среде кислорода в потоке рабочего тела дополнительной паровой турбины, что при соединении с непрореагировавшим кислородом приведет к образованию гремучей смеси. Также недостатком является коррозионный износ рабочих лопаток дополнительной паровой турбины из-за непрореагировавшего кислорода в условиях повышенной температуры свежего пара в результате его перегрева. Также недостатком является значительные затраты тепла из-за фазового изменения подаваемой воды на охлаждение водород-кислородной камеры сгорания, что сопряжено с образованием солевых отложений в тракте охлаждения, что со временем становится причиной ее неработоспособного состояния. Все это снижает безопасность, эффективность использования водорода и рабочий ресурс рабочих лопаток

дополнительной паровой турбины.

Известна установка для обеспечения маневренности АЭС (патент на полезную модель РФ №70312, МПК F01K 13/02, H02J 9/04, G21D 3/08, опубл. 20.01.2008 г) содержащая ядерный реактор, парогенератор, паровую турбину, соединенную с электрогенератором, и через конденсатор и конденсатный насос с системой регенеративных подогревателей низкого давления, связанной последовательно установленными деаэратором, питательным насосом парогенератора, подогревателями высокого давления, соединенными с парогенератором, причем подогреватели низкого и высокого давления через конденсатор связаны с паровой турбиной, выходной вал которой соединен с электрогенератором, который связан с реактором для получения кислорода и водорода, за которым установлены емкости для накопления и хранения кислорода и водорода, соединенные с расположенными в технологической последовательности камерой сгорания, паровой турбиной сверхкритических параметров, вторыми конденсатором и конденсатным насосом, связанным через регулирующий клапан с подогревателями низкого давления, деаэратором, питательным насосом камеры сгорания, подогревателями высокого давления, связанными с камерой сгорания, при этом конденсатный насос соединен с резервуаром для воды, связанный с помощью насосов с реактором для получения кислорода и водорода с одной стороны и с камерой сгорания с другой, а подогреватели низкого и высокого давления соединены через второй конденсатор с паровой турбиной сверхкритических параметров, соединенной со вторым электрогенератором.

Недостатком известной полезной модели является образование непрореагировавшего водорода после сжигания в среде кислорода в потоке рабочего тела паровой турбины сверхкритических параметров, что при соединении с непрореагировавшим кислородом приведет к образованию гремучей смеси. Также недостатком является коррозионный износ рабочих лопаток паровой турбины из-за непрореагировавшего кислорода в условиях повышенной температуры свежего пара в результате его перегрева. Также недостатком является необходимость использования принудительного внешнего охлаждения водород-кислородной камеры сгорания, что связано со значительным количеством отводимой теплоты, необходимой для изменения ее фазового состояния и сопряжено с образованием солевых отложений в тракте охлаждения, что со временем становится причиной ее неработоспособного состояния. Все это снижает безопасность, эффективность использования водорода и рабочий ресурс рабочих лопаток дополнительной паровой турбины.

Известна турбинная установка атомной электростанции (варианты) (патент РФ на изобретение №2459293, МПК G21D 1/00, опубл. 20.08.2012 г). Турбинная установка АЭС содержит паровую турбину с цилиндром высокого давления и цилиндром низкого давления, сепаратор, промежуточный перегреватель, систему для получения водорода и кислорода, включающую электролизную установку для получения водорода и кислорода с водородными и кислородными ресиверами, пароводородные перегреватели, устройство парораспределения. При этом вход цилиндра высокого давления соединен трубопроводом с устройством парораспределения, пароводородные перегреватели соединены с системой для получения водорода и кислорода. По первому варианту введена сателлитная вытесненного пара, которая подключена к устройству парораспределения, а выход цилиндра высокого давления через сепаратор, пароводородный перегреватель и промежуточный перегреватель соединен с входом цилиндра низкого давления. По второму варианту введена сателлитная паротурбинная установка с трубопроводом вытесненного пара и пароводородным перегревателем

вытесненного пара, соединенным с системой для получения водорода и кислорода и с устройством парораспределения перед цилиндром высокого давления, выход пароводородного перегревателя вытесненного пара соединен с сателлитной паротурбинной установкой, а выход цилиндра высокого давления соединен с входом цилиндра низкого давления.

Турбинная установка предназначена для устранения переменного расхода рабочего тела через основную паровую турбину АЭС при повышении мощности энергоблока выше номинальной.

Недостатком известного изобретения является образование непрореагировавшего водорода после сжигания в среде кислорода в потоке рабочего тела основной турбины АЭС и дополнительной паровой турбины, что при соединении с непрореагировавшим кислородом приведет к образованию гремучей смеси. Вместе с тем наличие непрореагировавшего кислорода будет способствовать коррозионному разрушению рабочих лопаток цилиндра низкого давления основной турбины АЭС и всех рабочих лопаток дополнительной турбины в условиях повышенной температуры пара в результате его перегрева. Также недостатком является необходимость использования принудительного внешнего охлаждения водород-кислородной камеры сгорания, что связано со значительным количеством отводимой теплоты, необходимой для изменения ее фазового состояния и сопряжено с образованием солевых отложений в тракте охлаждения, что со временем становится причиной ее неработоспособного состояния. Все это снижает безопасность, эффективность использования водорода и рабочий ресурс рабочих лопаток цилиндра низкого давления основной паровой турбины АЭС и всех рабочих лопаток дополнительной паровой турбины.

Наиболее близким аналогом является магнитная сепарация недоокисленного газообразного водорода из среды перегретого водяного пара под давлением с использованием магнитного поля соленоида после системы сжигания в паротурбинном цикле атомных теплоэнергетических установок (патент РФ на изобретение №2579849 С1, опубл. 10.04.2016 г). Магнитный сепаратор включает соленоид, рабочий канал для транспортировки очищаемого потока, при этом основной трубопровод круглого сечения имеет прямолинейное направление, во внутренней части которого в пристеночной области по всему периметру установлена селективная мембрана на основе сплава палладия с серебром на участке воздействия магнитного поля на очищаемый поток перегретого водяного пара под давлением от недоокисленного газообразного водорода после системы сжигания в цикле паротурбинной установки. С внешней стороны основного трубопровода предусмотрен сообщающийся с ним стравливающий трубопровод диффундирующего сквозь мембрану отсепарированного водорода с установленным на нем соответствующим выпускным клапаном, а также датчиком концентрации диффундирующего сквозь мембрану отсепарированного водорода.

Изобретение предназначено для использования в паротурбинных установках АЭС с системой сжигания водорода с кислородом с содержанием непрореагировавшего водорода в рабочем теле под давлением после системы сжигания перед поступлением в турбину.

Недостатком известного изобретения является невозможность полного удаления непрореагировавшего водорода, что приводит к сохранению опасности образования гремучей смеси водорода с кислородом, а также невозможность удаления непрореагировавшего кислорода, что приведет к коррозионному разрушению рабочих лопаток как основной турбины АЭС, так и дополнительной турбины в условиях повышения температуры пара в результате его перегрева. Все это снижает безопасность

использования водорода и рабочий ресурс рабочих лопаток паровой турбины АЭС и дополнительной турбины.

Задачей настоящего изобретения является повышение безопасности использования водорода в паротурбинной установке АЭС с использованием дополнительной турбины.

Техническим результатом, достигаемым при использовании настоящего изобретения, является практически полное удаление непрореагировавшего водорода при существенном снижении концентрации непрореагировавшего кислорода в рабочем теле паротурбинной установки АЭС и сохранение номинального рабочего ресурса рабочих лопаток основной турбины АЭС и дополнительной турбины.

Указанный технический результат достигается тем, что паротурбинная установка АЭС с использованием дополнительной паровой турбины с системой сжигания водорода в кислороде с содержанием непрореагировавшего водорода и кислорода в паровой фазе рабочего тела под давлением содержит магнитный сепаратор, включающий соленоид, рабочий канал для транспортировки очищаемого потока пара от непрореагировавшего водорода при этом основной трубопровод круглого сечения и выполнен с возможностью прямолинейного направления, во внутренней части которого в пристеночной области по всему периметру установлена селективная мембрана на основе сплава палладия с серебром на участке воздействия магнитного поля на очищаемый поток водяного пара, согласно изобретения, после водород-кислородной камеры сгорания перед цилиндром высокого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС и после промежуточного пароперегревателя перед цилиндром низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС установлены каталитические рекомбинаторы (дожигатели) непрореагировавшего водорода.

Повышение безопасности и эффективности использования водорода в паротурбинной установке АЭС при повышении ее мощности выше номинальной достигается за счет того, что в каталитических рекомбинаторах происходит дожигание непрореагировавшего водорода с кислородом, что существенно снижает его концентрацию в рабочем теле дополнительной и основной турбины паротурбинной установки АЭС при этом в устройстве магнитного сепаратора за счет воздействия неоднородного магнитного поля соленоида происходит дополнительное удаление оставшегося количества непрореагировавшего водорода за счет его сорбции в мембране из палладиевого сплава. Возможный оставшийся непрореагировавший кислород удаляется системой эжекторных насосов. Комбинирование каталитического дожигания и магнитного сепаратора позволяет практически полностью удалить непрореагировавший водород из рабочего тела дополнительной и основной турбины паротурбинной установки АЭС. При этом водород-кислородные камеры сгорания, установленные перед цилиндром высокого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС и перед пароперегревателем основной турбины паротурбинной установки АЭС выполнены из ультравысокотемпературного керамического материала без принудительного водяного охлаждения. Данные материалы способны длительно работать в окислительной среде при температурах до 2000°С. При этом температура плавления у керамики на основе борида гафния и циркония 3380 и 3250°С соответственно. Температура плавления у керамики на основе карбида гафния 3890°С. Имеют небольшую плотность и высокие прочностные свойства при повышенных температурах. Таким образом, данные материалы более надежны и долговечны в условиях термических напряжений при сжигании водорода в кислороде без использования внешнего водяного охлаждения по сравнению с жаропрочными

сталями и сплавами, такими как, например, ХН35ВТ, 36Х18Н25С2, 13Х11Н2ВМФ, 12Х18Н10Т.

Изобретение иллюстрируется чертежом, где на фиг. 1 показана принципиальная схема ПТУ АЭС с дополнительной паровой турбиной и с системой безопасного использования водорода.

Позиции на чертеже обозначают следующее: 1 - цилиндр высокого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС; 2 - цилиндр низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС; 3 - сепаратор основной турбины паротурбинной установки АЭС; 4 - водород-кислородная камера сгорания из ультравысокотемпературного материала основной турбины паротурбинной установки АЭС; 5 - промежуточный перегреватель основной турбины паротурбинной установки АЭС; 6 - каталитический рекомбинатор непрореагировавшего водорода основной турбины паротурбинной установки АЭС; 7 - электрический генератор основной турбины паротурбинной установки АЭС; 8 - магнитный сепаратор непрореагировавшего водорода основной турбины паротурбинной установки АЭС; 9 - конденсатор основной турбины паротурбинной установки АЭС; 10 - конденсатный насос основной турбины паротурбинной установки АЭС; 11 - подогреватели низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС; 12 - рециркуляция добавленного рабочего тела при промперегреве пара основной турбины паротурбинной установки АЭС; 13 - водород-кислородная камера сгорания из ультравысокотемпературного материала дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС; 14 - каталитический рекомбинатор непрореагировавшего водорода дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС; 15 - цилиндр высокого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС; 16 - сепаратор дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС; 17 - цилиндр низкого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС; 18 - электрический генератор дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС; 19 - магнитный сепаратор непрореагировавшего водорода дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС; 20 - конденсатор дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС.

Паротурбинная установка АЭС с дополнительной паровой турбиной и с системой безопасного использования водорода содержит основную паровую турбину с цилиндром высокого давления 1 и цилиндром низкого давления 2, сепаратор основной турбины паротурбинной установки АЭС 3, водород-кислородную камеру сгорания из ультравысокотемпературного материала основной турбины паротурбинной установки АЭС 4. промежуточный перегреватель основной турбины паротурбинной установки АЭС 5, каталитический рекомбинатор непрореагировавшего водорода основной турбины паротурбинной установки АЭС 6, электрический генератор основной турбины паротурбинной установки АЭС 7, магнитный сепаратор непрореагировавшего водорода основной турбины паротурбинной установки АЭС 8, конденсатор основной турбины паротурбинной установки АЭС 9, конденсатный насос основной турбины паротурбинной установки АЭС 10, подогреватели низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС 11, рециркуляция добавленного рабочего тела при промперегреве пара основной турбины паротурбинной установки АЭС 12, водород-кислородная камера сгорания из ультравысокотемпературного материала дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 13, каталитический рекомбинатор непрореагировавшего водорода дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 14, цилиндр высокого давления 15 и цилиндр низкого давления 17 дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС, сепаратор дополнительной

турбины паротурбинной установки АЭС 16, электрический генератор дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 18, магнитный сепаратор непрореагировавшего водорода дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 19, конденсатор дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 20, систему для получения водорода и кислорода, включающую электролизную установку с водородными и кислородными ресиверами. При этом вход водород-кислородных камер сгорания 4 и 13 соединен с магистралями подачи водорода и кислорода из системы получения и хранения. Вход камеры сгорания 4 через сепаратор 3 соединен с выходом цилиндра высокого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС. Выход камеры сгорания 4 через промежуточный перегреватель пара 5 и каталитический рекомбинатор 6 основной турбины паротурбинной установки АЭС соединен со входом в цилиндр низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС 2. Выход цилиндра низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС 2 соединен со входом в магнитный сепаратор 8, выход которого соединен со входом в конденсатор 9 основной турбины паротурбинной установки АЭС. Выход конденсатора основной турбины паротурбинной установки АЭС 9 соединен через конденсатный насос 10 с подогревателями низкого давления 11 и с системой регенерации. Рециркуляция 12 подмешанного пара, полученного при сжигании водорода в кислороде, к основному пару основной турбины паротурбинной установки АЭС при промперегреве в виде конденсата осуществляется после подогревателей низкого давления 11 с целью возврата в электролиз. Вход водород-кислородной камеры сгорания 13 соединен с трубопроводом подачи свежего пара из парогенераторов в количестве, равном вытесненному пару, предназначенного для промперегрева пара основной турбины паротурбинной установки АЭС. Выход водород-кислородной камеры сгорания 13 соединен с входом в каталитический рекомбинатор 14, выход которого соединен с входом в цилиндр высокого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 15, а выход цилиндра высокого давления дополнительной турбины соединен через сепаратор 16 с входом в цилиндр низкого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 17. Выход цилиндра низкого давления дополнительной турбины 17 соединен с входом в магнитный сепаратор 19, выход которого соединен с входом в конденсатор дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 20.

Паротурбинная установка АЭС с дополнительной паровой турбиной и с системой безопасного использования водорода включает подачу водорода и кислорода по подводящим магистралям в водород-кислородные камеры сгорания 4 и 13, выполненные из ультравысокотемпературного керамического материала без принудительного водяного охлаждения, соединенные с системой получения и хранения водорода и кислорода. За счет ступенчатого окисления водорода кислородом с образованием высокотемпературного пара и его смешения с паром основной турбины паротурбинной установки АЭС осуществляется промперегрев. При этом пар, предназначенный для промперегрева поступает в водород-кислородную камеру сгорания дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 13, где он перегревается. Ввиду сложности обеспечения условий для полного сжигания водорода, образуется непрореагировавший водород и кислород в паре дополнительной и основной турбины паротурбинной установки АЭС. С целью снижения концентрации непрореагировавшего водорода и недопущения образования гремучей смеси, перед цилиндром низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС 2 и перед цилиндром высокого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 15 установлены каталитические рекомбинаторы 6 и 14 соответственно, в которых происходит дожигание

непрореагировавшего водорода в кислороде. Дополнительно после цилиндра низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС 2 и после цилиндра низкого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 17 установлены магнитные сепараторы непрореагировавшего водорода 8 и 19 соответственно, в котором под воздействием неоднородного магнитного поля соленоида происходит дополнительное удаление оставшегося количества непрореагировавшего водорода посредством контактной палладиевой мембраны. Возможный оставшийся непрореагировавший кислород удаляется системой эжекторных насосов. На основе выполненных расчетов автором заявки определена возможность практически полного удаления непрореагировавшего водорода из рабочего тела паротурбинного цикла АЭС с предотвращением образования гремучей смеси.

Паротурбинная установка АЭС с дополнительной паровой турбиной и с системой безопасного использования водорода работает следующим образом. В ночные провальные часы электрической нагрузки за счет процесса электролиза воды происходит аккумулирование невостребованной электроэнергии АЭС в виде водорода и кислорода, которые при помощи дожимных водородных и кислородных компрессорных агрегатов поступают в систему хранения на основе металлических емкостей. В пиковые часы электрических нагрузок водород и кислород отбираются из емкостей хранения и при помощи дожимных водородных и кислородных компрессорных агрегатов подаются по соответствующим подводящим магистралям в водород-кислородные камеры сгорания 4 и 13, выполненные из ультравысокотемпературного керамического материала. За счет водород-кислородной камеры сгорания 4 осуществляется промперегрев пара основной турбины паротурбинной установки АЭС за счет смешения с паром, полученного при сжигании водорода в кислороде, что приводит к возможности подачи вытесненного пара, предназначенного для промперегрева в водород-кислородную камеру сгорания 13 дополнительной турбины. В водород-кислородной камере сгорания 13 за счет высокотемпературного пара, полученного в результате ступенчатого окисления водорода кислородом и его смешения со свежим паром перед цилиндром высокого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 15, происходит его перегрев. В результате повышается температура пара при входе в дополнительную турбину, что способствует повышению вырабатываемой мощности выше номинальной электрогенератором 18. За счет применения ультравысокотемпературного керамического материала для водород-кислородных камер сгорания 4 и 13 отсутствует необходимость их принудительного водяного охлаждения, что исключает затраты тепла на фазовое превращение охлаждающей воды и повышает термодинамическую эффективность использования теплоты от сжигания водорода в паротурбинном цикле АЭС. Ввиду сложности обеспечения условий для полного сжигания водорода, образуется непрореагировавший водород и кислород в паре дополнительной и основной турбины паротурбинной установки АЭС. С целью снижения концентрации непрореагировавшего водорода и недопущения образования гремучей смеси перед цилиндром низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС 2 и перед цилиндром высокого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 15 установлены каталитические рекомбинаторы 6 и 14 соответственно, в которых происходит дожигание непрореагировавшего водорода в кислороде. Дополнительно после цилиндра низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС 2 и после цилиндра низкого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС 17 установлены магнитные сепараторы непрореагировавшего водорода 8 и 19 соответственно, в котором под воздействием

неоднородного магнитного поля соленоида происходит дополнительное удаление оставшегося количества непрореагировавшего водорода посредством контактной палладиевой мембраны. После того, как пар с содержанием некоторого количества непрореагировавшего водорода и кислорода отработал в цилиндре низкого давления и давление его снизилось, далее двигается в трубопроводе прямолинейного направления через область воздействия неоднородного магнитного поля соленоида, в виде обмотки токового провода в изоляции с внешней стороны трубопровода, находящейся внутри водяной рубашки охлаждения и подключенного к источнику электропитания. При этом на внутренней поверхности участка трубопровода по всему периметру нанесена палладиевая мембрана. Необходимая рабочая температура мембраны может быть обеспечена электронагревом. Вследствие того, что соленоид обмотан с внешней стороны трубопровода, то вектор магнитной индукции сонаправлен с направлением движения пара с содержанием непрореагировавшего водорода и кислорода. В этом случае возникающая сила Лоренца, действующая на электроны непрореагировавшего водорода, направлена перпендикулярно линиям магнитной индукции поля. У молекулярного водорода (диамагнетик) ввиду спаренности электронов отсутствует собственное внешнее магнитное поле. Под воздействием неоднородного внешнего магнитного поля в результате действия силы Лоренца искривляются сферические орбиты движения электронов, что создаем силу, стремящаяся переместить водород в область более слабого поля, т.е., в направлении к периферии внутреннего пространства трубопровода, где искривления орбит будут минимальными. У молекулярного кислорода (парамагнетик) ввиду наличия неспаренных электронов имеется собственное внешнее магнитное поле. Под воздействием неоднородного внешнего магнитного поля спины неспаренных электронов ориентируются в направлении поля и кислород втягивается в область более сильного поля, т.е., в направлении к центральной оси соленоида, совпадающей с центром трубопровода. Таким образом, это приводит к взаимному разделению водорода и кислорода в неоднородном магнитном поле. Возможный оставшийся непрореагировавший кислород удаляется системой эжекторных насосов. На основе выполненных расчетов автором заявки определена возможность практически полного удаления непрореагировавшего водорода из рабочего тела основной и дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС с предотвращением образования гремучей смеси. Таким образом, комбинирование каталитических рекомбинаторов и магнитного сепаратора создает условия, при которых в конденсаторах основной и дополнительной турбин паротурбинной установки АЭС 9 и 20 соответственно не возникает образование гремучей смеси в виде неконденсирующихся газов - водорода и кислорода.

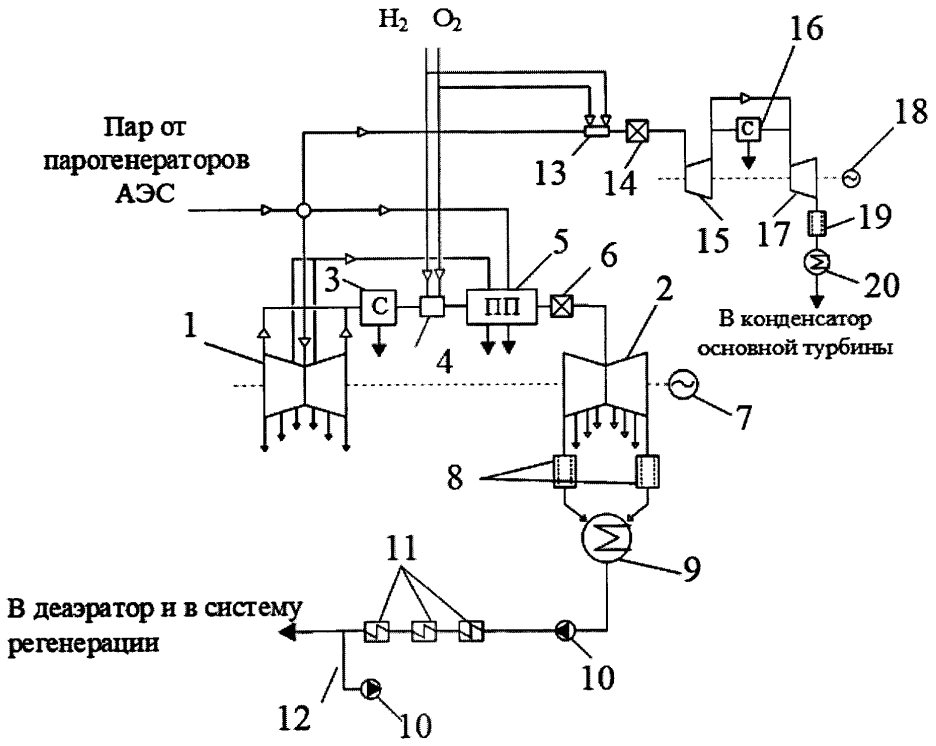
Отличительным признаком предложенной паротурбинной установки АЭС с дополнительной паровой турбиной и с системой безопасного использования водорода является практически полное удаление непрореагировавшего водорода при существенном снижении концентрации непрореагировавшего кислорода из паровой фазы рабочего тела основной и дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС и сохранение номинального рабочего ресурса рабочих лопаток основной паровой турбины АЭС и дополнительной турбины.

(57) Формула изобретения

Паротурбинная установка АЭС с использованием дополнительной паровой турбины с системой сжигания водорода в кислороде с содержанием непрореагировавшего водорода и кислорода в паровой фазе рабочего тела под давлением, содержащая

магнитный сепаратор, включающий соленоид, рабочий канал для транспортировки очищаемого потока пара от непрореагировавшего водорода, при этом основной трубопровод круглого сечения и выполнен с возможностью прямолинейного направления, во внутренней части которого в пристеночной области по всему периметру установлена селективная мембрана на основе сплава палладия с серебром на участке воздействия магнитного поля на очищаемый поток водяного пара, отличающаяся тем, что после водород-кислородной камеры сгорания перед цилиндром высокого давления дополнительной турбины паротурбинной установки АЭС и после промежуточного пароперегревателя перед цилиндром низкого давления основной турбины паротурбинной установки АЭС установлены каталитические рекомбинаторы (дожигатели) непрореагировавшего водорода.

1


H_2 O_2
16
18
Пар от парогенераторов АЭС
13
14
15
17
19
20
5
6
3
С
ПП
2
1
4
В конденсатор основной турбины
7
8
9
11
В деаэратор и в систему регенерации
10
12
10

Фиг. 1