

(12) МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗАЯВКА, ОПУБЛИКОВАННАЯ В
СООТВЕТСТВИИ С ДОГОВОРом О ПАТЕНТНОЙ КООПЕРАЦИИ (РСТ)

(19) Всемирная Организация
Интеллектуальной Собственности
Международное бюро

(43) Дата международной публикации
07 мая 2020 (07.05.2020)



(10) Номер международной публикации
WO 2020/091623 A1

(51) Международная патентная классификация:
G21C 15/18 (2006.01) G21C 17/022 (2006.01)

(21) Номер международной заявки: РСТ/RU2018/000897

(22) Дата международной подачи:
28 декабря 2018 (28.12.2018)

(25) Язык подачи: Русский

(26) Язык публикации: Русский

(30) Данные о приоритете:
2018138641 01 ноября 2018 (01.11.2018) RU

(71) Заявитель: АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "АТОМ-
ЭНЕРГОПРОЕКТ" (JOINT-STOCK COMPANY
"ATOMENERGOPROEKT") [RU/RU]; ул. Бакуни-
нская, 7 Москва, 107996, Moscow (RU).

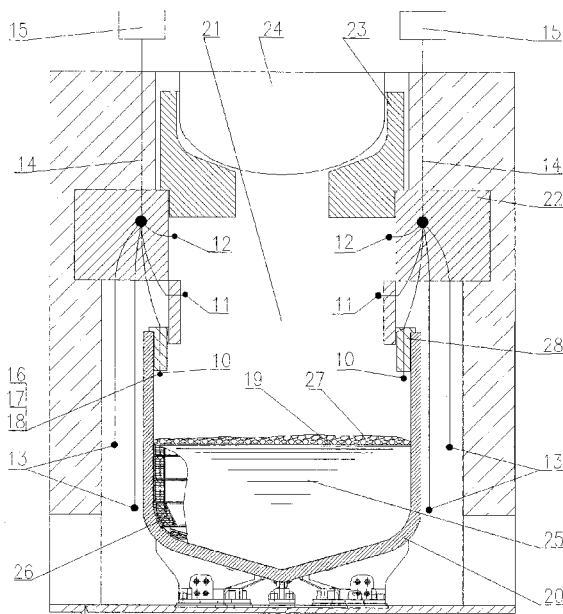
(72) Изобретатели: СИДОРОВ, Александр Стальевич
(SIDOROV, Aleksandr Stalevich); ул. Ключевая, 20,
кв. 87 Москва, 115612, Moscow (RU). СИДОРО-
ВА, Надежда Васильевна (SIDOROVA, Nadezhda
Vasilevna); ул. Ключевая, 20, кв. 87 Москва, 115612,
Moscow (RU).

(74) Агент: СИЛАЕВ, Дмитрий Вячеславович (SILAEV,
Dmitrij Vyacheslavovich); АО "ИК АСЭ", Дмитровское
шоссе, 2, стр. 1 Москва, 127434, Moscow (RU).

(81) Указанные государства (если не указано иначе, для
каждого вида национальной охраны): AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ,
CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP,

(54) Title: METHOD FOR COOLING NUCLEAR REACTOR CORE MELT AND SYSTEM FOR MONITORING THE COOLING OF NUCLEAR REACTOR CORE MELT

(54) Название изобретения: СПОСОБ ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА И СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА



Фиг.2

(57) Abstract: The group of inventions relates to systems for the safe operation of nuclear power stations in the event of an emergency. A method for cooling nuclear reactor core melt consists in determining the location of molten core fragments within a reactor vessel and the status of core penetration on the basis of information obtained from temperature sensors mounted inside the nuclear reactor, supplying a coolant to the reactor core, and increasing or reducing the volume of coolant supplied to the core after penetration of the reactor vessel. The degree of damage to the reactor vessel and the time of commencement of melt efflux from the vessel into a core catcher are determined. Coolant is supplied to the housing of the core catcher with a predetermined time delay. The time of commencement of crust formation, the time of cessation of aerosol release, the time of completion of vapour sorption, and the time of hydrogen formation are determined. The volume of coolant supplied is regulated taking into account the thermophysical properties of certain media, and the volume of coolant supplied is regulated taking into account minimum and maximum water levels in the reactor cavity. A system for monitoring the cooling of nuclear reactor core melt is also provided. The result is more efficient cooling of nuclear reactor core melt.

(57) Реферат: Группа изобретений относится к системам обеспечения безопасной работы атомных электростанций при авариях. Способ охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора заключается в определении местоположения расплавленных обломков активной зоны в корпусе реактора и состояния проплавления активной зоны по информации, полученной от датчиков

KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) **Указанные государства** (если не указано иначе, для каждого вида региональной охраны): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), евразийский (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), европейский патент (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Опубликована:

— с отчётом о международном поиске (статья 21.3)

температуры, установленных в ядерном реакторе, подаче охлаждающей жидкости в активную зону реактора, увеличении или уменьшении объема подачи охлаждающей жидкости в активную зону после проплавания корпуса реактора. Определяют степень разрушения корпуса ядерного реактора и время начала истечения расплава из корпуса в ловушку расплава. Подают охлаждающую жидкость внутрь корпуса ловушки расплава с установленной задержкой по времени. Определяют время начала образования корки, время прекращения выхода аэрозолей, время завершения сорбции пара и время образования водорода. Регулируют объем подачи охлаждающей жидкости с учетом теплофизических параметров сред, регулируют объем подачи охлаждающей жидкости с учетом минимального и максимального уровней воды в шахте реактора. Имеется также система контроля охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора. Достигается повышение эффективности охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора.

Способ охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора и система контроля охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора

5 Изобретения относятся к системам обеспечения безопасной работы атомных электростанций (АЭС) при тяжелых авариях, конкретно, к способам и системам охлаждения и контроля охлаждения расплава активной зоны ядерных реакторов.

10 При тяжелой аварии на АЭС происходит повреждение активной зоны ядерного реактора, в результате чего расплав поступает в нижнюю часть корпуса реактора, и, в свою очередь, разрушает её. Разрушение корпуса реактора может привести к нежелательным последствиям, например, к усложнению процедуры контроля за распространением и физико-химическим поведением расплава. Летучие и аэрозольные формы радиоактивных продуктов
15 распада диффундируют в контайнмент, угрожая его целостности, просачиваются наружу и вызывают радиоактивное заражение местности. Для существенного уменьшения этих негативных последствий и исключения непроектных дозовых нагрузок на население и окружающую среду, современные АЭС, как правило, оснащены ловушками расплава,
20 установленными под ядерным реактором, поэтому после проплавления нижней части корпуса реактора, расплав попадает в ловушку расплава, в которой происходит его локализация и охлаждение.

 Обычно, с целью охлаждения расплава, в ловушку расплава вводят охлаждающую жидкость (воду).

25 Для контроля потока расплава после разрушения корпуса реактора, над ловушкой расплава устанавливают датчики температуры, например, термопары, предназначенные для контроля температуры потока расплава и его местоположения после разрушения ядерного реактора.

Подача воды на расплав в корпус реактора, либо за его пределы, должна осуществляться с учетом того, чтобы избежать парового взрыва внутри контейнента, однако при перемешивании воды с расплавом металлов при струйном поступлении воды сверху на расплав, либо выливании расплава металлов в смеси с расплавом оксидов в воду, находящуюся в напорной камере реактора, в процессе проплавления корок, окружающих бассейн расплава, образовавшегося внутри активной зоны при расплавлении тепловыделяющих элементов, невозможно исключить разрушительные паровые взрывы, потому что диспергирование струй расплава в воде, взаимодействие диспергированных струй и спутных потоков с поверхностями оборудования, находящегося в напорной камере реактора, или с внутренней поверхностью днища корпуса реактора создают, практически, идеальные условия для максимального высвобождения аккумулированной энергии расплавом.

Во избежание парового взрыва, поверхность расплава (зеркало расплава), обычно сразу не охлаждают, а охлаждение обычно осуществляют после получения информации о состоянии расплава. Некоторые ловушки расплава спроектированы аналогичным образом с размещением внутри ловушки расплава жертвенного материала. По истечении определенного времени, компоненты жертвенного материала поднимаются над расплавом для предотвращения парового взрыва, или в расплаве в процессе химического взаимодействия с жертвенным материалом происходит инверсия оксидных и металлических компонентов, при которой оксидные компоненты расплава поднимаются вверх, а металлические опускаются вниз, создавая тем самым благоприятные условия для подачи воды на поверхность расплава (на оксидные его компоненты). В некоторых конструкциях ловушек расплава для отвода и распределения расплава используется специальный отводной резервуар, обеспечивающий растекание расплава по большой площади относительно тонким слоем, позволяющим выполнить струйное охлаждение (душирование) расплава без риска возникновения паровых взрывов. Подача воды, в данном

случае, осуществляется только при условии полного растекания расплава внутри ловушки, в противном случае, например, при нарушении режима растекания расплава и скапливании расплава на ограниченной площади, возможно термохимическое разрушение основания ловушки, или появление
5 условий для парового взрыва в режиме подачи охлаждающей воды сверху на расплав.

После проплавления корпуса реактора, вопрос о подаче воды в него больше не рассматривается.

В некоторых конструкциях АЭС корпус реактора заполняют водой до
10 возникновения расплавления корпуса реактора. Заполнение водой происходит на этапах разрушения активной зоны, стекания расплава из активной зоны на днище корпуса реактора, накопления расплава на днище корпуса реактора, вплоть до разрушения днища. Эта процедура является очень опасной. Причиной этому является паровой взрыв, развивающийся как при смешении
15 воды с жидкими металлами, так и при смешении с жидкими оксидами, которые в чистом виде в расплаве никогда не присутствуют, только в смеси с некоторым количеством жидких металлов.

С другой стороны, возникает неопределенность с подачей охлаждающей воды в корпус реактора, связанная с отсутствием информации о расположении
20 расплава внутри корпуса реактора. Таким образом, подача воды в корпус реактора не гарантирует его безопасность.

Система контроля реактора измеряет нейтронный поток за пределами корпуса реактора, контролирует изменения реактивности активной зоны, изменения мощности, и другие параметры, во время нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации, при проектных и запроектных авариях
25 без разрушения активной зоны реактора. Данная система специально не предназначена для мониторинга тяжёлых аварий на АЭС, при которых ряд факторов, таких как изменение расположения элементов активной зоны и её твердых фрагментов, изменение расположения элементов внутрикорпусных

устройств, а также изменение положения и объёма расплава активной зоны внутри корпуса реактора, изменение его химического состава и фазового состояния, включая образование шуги (двухфазное твёрдо-жидкое состояние) и расслоение, изменение его термомеханического состояния, приводят к
5 существенному искажению и изменению данных о физических параметрах активной зоны как внутри, так и за пределами корпуса реактора.

Известен способ [1] охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора, заключающийся в определении, после разрушения расплавом активной зоны корпуса ядерного реактора, местоположения расплавленных
10 обломков активной зоны в корпусе реактора и определении состояния расплавленной активной зоны по информации, полученной от датчиков температуры, установленных в ядерном реакторе, подаче охлаждающей жидкости в активную зону реактора с учетом полученной информации, увеличении или уменьшении объема подачи охлаждающей жидкости в
15 активную зону ядерного реактора после проплавления корпуса реактора, подаче охлаждающей жидкости в активную зону ядерного реактора с учетом фактического положения и состояния расплавленных элементов активной зоны ядерного реактора.

Известна система, предназначенная для реализации способа [1],
20 содержащая первую группу датчиков температуры, установленных над активной зоной ядерного реактора, вторую группу датчиков температуры, установленных на внешней стороне корпуса ядерного реактора, третью группу датчиков температуры, установленных на днище корпуса ядерного реактора, четвертую группу датчиков температуры, установленных в зоне между
25 ловушкой расплава и днищем корпуса ядерного реактора, соединенных с оборудованием управления.

Одним из недостатков способа, как и системы, предназначенной для его реализации, является то, что при температуре выше 1100°C начинается активное окисление циркония с выделением водорода. Температура в этом

процессе быстро повышается от 1200°C до 1800-2200°C и выше. Это приводит к разрушению датчиков температуры, установленных внутри корпуса реактора, и, в сущности, позволяет определить только момент начала разрушения активной зоны и приблизительно локализовать область, в которой процесс разрушения происходит быстрее, исходя из данных о повышении температуры и данных по отказам датчиков. Датчики температуры, установленные внутри корпуса реактора над активной зоной, будут некоторое время показывать температуру парогазовой среды (температуру смеси пара и водорода), искажённую циркуляционными процессами в активной зоне. Эти датчики достаточно продолжительное время могут показывать вполне приемлемую температуру из-за специфических особенностей конструкции активной зоны, обеспечивающей возможность циркуляции парогазовой смеси по нескольким, практически независимым, периферийным каналам, что приводит к сильному занижению средней температуры парогазовой смеси над активной зоной в сравнении с аналогичной температурой в её каналах.

Ещё одним недостатком способа, как и системы, предназначенной для его реализации, является то, что датчики температуры, установленные на внешней поверхности корпуса реактора, не позволяют определить состояние активной зоны из-за тепловой инерции корпуса реактора и искажений температурных полей, вызванных внутриреакторными процессами, связанными с парогазовой конвекцией, плавлением активной зоны, переизлучением и другими термохимическими и теплогидравлическими процессами. Таким образом, датчики температуры, установленные на внешней поверхности корпуса реактора, детектируют некоторые изменения, но этой информации явно недостаточно для определения состояния активной зоны и, особенно, состояния расплава, без привлечения дополнительных данных по параметрам сред в первом контуре и в гермозоне.

Следовательно, внешний контроль состояния активной зоны в корпусе реактора не является самостоятельным контролем, и не может функционировать отдельно.

В итоге, ввиду отсутствия достоверной информации о состоянии и
5 расположении расплава внутри корпуса реактора, охлаждение расплава посредством подачи охлаждающей жидкости (воды) в корпус реактора становится невозможным, так как это может привести к паровому взрыву и разрушению не только корпуса реактора, но и контейнмента, что в результате приведет к выходу радиоактивных продуктов деления за пределы площадки
10 АЭС.

Технический результат заявленных изобретений заключается в повышении безопасности АЭС. эффективности охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора.

Задачей, на решение которой направлены заявленные изобретения,
15 является повышение эффективности охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора за счет безопасного снятия тепловой нагрузки с зеркала расплава, обеспечивающего исключение паровых взрывов, приводящих к разрушению зоны локализации аварий, шахты реактора и гермооболочки.

Поставленная задача решается за счёт того, что в способе охлаждения
20 расплава активной зоны ядерного реактора, заключающемся в определении, после разрушения расплавом активной зоны корпуса ядерного реактора, местоположения расплавленных обломков активной зоны и определении состояния проплавления активной зоны по информации, полученной от датчиков температуры, подаче охлаждающей жидкости, увеличении или
25 уменьшении объема подачи охлаждающей жидкости, согласно изобретению, после разрушения расплавом активной зоны корпуса ядерного реактора, определяют степень разрушения корпуса ядерного реактора и время начала истечения расплава из корпуса ядерного реактора в ловушку расплава, затем подают охлаждающую жидкость внутрь корпуса ловушки расплава с заранее

установленной задержкой по времени, из шахт ревизии внутрикорпусных устройств и блока защитных труб ядерного реактора, после чего определяют условия образования шлаковой шапки над поверхностью зеркала расплава, определяют время начала образования корки на поверхности расплава, определяют время прекращения выхода аэрозолей, определяют время завершения сорбции пара и время образования водорода, определяют время стабилизации процессов охлаждения расплава и время выхода этих процессов в квазистационарный режим, затем регулируют объем подачи охлаждающей жидкости с учетом теплофизических параметров сред в герметичном объеме контейнмента, после чего регулируют объем подачи охлаждающей жидкости с учетом минимального и максимального уровней воды в шахте реактора.

Система контроля охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора, содержащая датчики температуры, соединенные с оборудованием управления, согласно изобретению, дополнительно содержит датчики-уровнемеры, установленные под фермой-консолью вдоль корпуса ловушки расплава в зоне её наружного водяного охлаждения, при этом датчики температуры разделены на первую, вторую и третью группы, первая группа датчиков температуры установлена над зеркалом расплава внутри корпуса ловушки расплава, а их рабочие органы направлены к зеркалу расплава, вторая группа датчиков температуры установлена между корпусом ловушки расплава и фермой-консолью, третья группа датчиков температуры установлена под направляющей плитой, при этом все датчики температуры и датчики-уровнемеры объединены в два канала, а на рабочих органах каждого датчика температуры установлены герметичные концевики, покрытые защитными негерметичными колпаками.

Отличительным признаком и принципиальным отличием заявленного способа от прототипа является то, что при разрушении активной зоны осуществляют контроль состояния ловушки расплава, а не внутриреакторного пространства, что обусловлено тем, что корпус реактора, как часть (и весь

первый контур, как целое), является закрытой по отношению к гермооболочке энерговыделяющей системой (прочной и плотной при нормальной эксплуатации), а ловушка расплава является открытой энерговыделяющей системой, встроенной в гермооболочку, что позволяет выполнять как
5 контролирующие, так и регулирующие процедуры в гермооболочке для обеспечения эффективного воздействия на ловушку расплава.

Невозможность воздействовать аналогичными процедурами со стороны гермооболочки на внутриреакторные процессы связана с тем обстоятельством, что при любых разрушениях первого контура, вплоть до максимальной
10 проектной аварии (с разрывом главного циркуляционного трубопровода полным сечением) внутриреакторное пространство все равно остаётся по отношению к гермооболочке закрытой системой, одним из отличительных признаков которой является некоторое избыточное остаточное давление в корпусе реактора по отношению к давлению в гермооболочке, не позволяющее
15 осуществлять эффективное опосредованное внешнее управление процессами внутри корпуса реактора с помощью изменения параметров процессов в гермооболочке.

Одним отличительным признаком заявленной системы является то, что датчики температуры и датчики-уровнемеры, сгруппированные в два канала,
20 устанавливают на корпусе ловушки расплава, а не на корпусе ядерного реактора, что позволяет осуществлять как контролирующие, так и регулирующие действия в процессе охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора.

Ещё одним отличительным признаком заявленной системы является то,
25 что датчики температуры установлены на трех различных уровнях относительно зеркала расплава, что позволяет обеспечить получение каждым каналом эквивалентной характеристической информации.

Ещё одним отличительным признаком заявленной системы является то, что все датчики температуры, находящиеся внутри корпуса ловушки расплава,

или в зонах прямого и косвенного действия расплава, имеют защитные концевики, которые обеспечивают термохимическую и газодинамическую защиту их рабочих органов.

Ещё одним отличительным признаком заявленной системы является то, что все концевики датчиков температуры установлены в защитных негерметичных колпаках, обеспечивающих термомеханическую защиту от брызг или небольшого количества расплава активной зоны, струй жидкого бетона и его фракций, мелких летящих предметов и аэрозолей.

На фиг.1 представлена блок-схема способа охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора.

На фиг.2 представлена система контроля охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора.

На фиг.3 представлена защита датчиков температурного контроля - герметичный концевик и защитный колпак.

Заявленные изобретения работают следующим образом.

Процесс охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора состоит из нескольких основных этапов:

- определение (1) степени разрушения корпуса ядерного реактора и времени начала истечения расплава из корпуса ядерного реактора в ловушку расплава;

- подача (2) охлаждающей жидкости внутрь корпуса ловушки расплава с заранее установленной задержкой по времени, из шахт ревизии внутрикорпусных устройств и блока защитных труб ядерного реактора;

- определение (3) условия образования шлаковой шапки над поверхностью зеркала расплава

- определение (4) времени начала образования корки на поверхности расплава;

- определение (5) времени прекращения выхода аэрозолей;

- определение (6) времени завершения сорбции пара и образования водорода;

- определение (7) времени стабилизации процессов охлаждения расплава;

- определение (8) времени выхода этих процессов в квазистационарный

5 режим;

- увеличение или уменьшение (9) объема подачи охлаждающей жидкости с учетом теплофизических параметров сред в герметичном объеме контейнмента;

10 - увеличение или уменьшение (10) объема подачи охлаждающей жидкости с учетом минимального и максимального уровней воды в шахте реактора.

Суть данного процесса заключается в следующем. После проплавления корпуса ядерного реактора расплав активной зоны начинает поступать на направляющую плиту и стекать по ней в ловушку расплава. Этому процессу
15 предшествуют два события, определяющие последующие управляющие действия: первое – поступление теплоносителя первого контура и охлаждающей воды из активных и пассивных систем в помещение фильтров (в бак-прямо́к), связанное с шахтой реактора, в которой установлена ловушка расплава, и второе – нагрев сначала воздушной, а затем парогазовой среды во
20 внутреннем объёме ловушки расплава. Первое событие, вызванное, например, разрывом трубопровода первого контура с последующими отказами активных систем безопасности и нормальной эксплуатации, или с разрывом трубопровода первого контура и полным обесточиванием АЭС, приводит к истечению сначала теплоносителя, а затем охлаждающей воды из пассивных
25 систем безопасности в гермообъём. Эта вода образует связанный уровень в помещении фильтров и в шахте реактора вокруг корпуса ловушки расплава, который диагностируется группой датчиков-уровнемеров, установленных под фермой-консолью вдоль корпуса ловушки расплава в зоне её наружного водяного охлаждения. Вода поступает в помещение фильтров и в шахту

реактора, связанную с ним проходными сечениями, расположенными в её основании. Датчики-уровнемеры диагностируют появление воды вокруг корпуса ловушки расплава, при этом датчики температуры, находящиеся на трёх уровнях, показывают в этот период времени температуру внутри ловушки расплава не более 400°C, что связано с отсутствием расплава активной зоны в корпусе реактора. Постепенно охлаждающая вода выкипает из корпуса реактора, активная зона разогревается, разрушается, и плавится, стекая на днище корпуса реактора. Но даже и в этом случае датчики температуры, находясь ниже днища корпуса реактора, показывают температуру ниже 400°C, потому что защищены направляющей плитой и фермой-консолью. Вся газовая конвекция от нагретого корпуса осуществляется значительно выше расположения датчиков температуры, которые находятся в относительно холодной термостатированной зоне, при этом температура в этой зоне сохраняется постоянной за счет квазистационарной температуры воды в помещении фильтров.

При разрушении корпуса реактора происходят следующие процессы: изменение давления в ловушке расплава и поступление на первой стадии жидких металлов с некоторым количеством жидких оксидов в наполнитель УЛР, при этом датчики температуры первой, второй и третьей группы либо нагреваются выше температуры 400°C, либо разрушаются вытекающим расплавом, то есть, находятся в состоянии отказа. По двум этим признакам: перегрев датчика температуры или отказ датчика температуры (разрушение), определяют (1) начало поступления расплава активной зоны из корпуса ядерного реактора в ловушку расплава. Фактически, по этим двум признакам, также определяется и степень разрушения корпуса реактора, по которой, в свою очередь, определяется стадийность истечения расплава из корпуса реактора в ловушку расплава, а именно: а) либо сначала вытекают жидкие металлы, а затем через некоторое время вытекают жидкие оксиды, что указывает на наличие бокового проплавления корпуса реактора; б) одновременное истечение

всего расплава одним объёмом из корпуса реактора, что указывает на разрушение днища корпуса реактора. Оба эти условия определяются по показаниям, полученным от датчиков температуры первой, второй и третьей группы, а именно:

5 а) если после разрушения корпуса реактора датчики температуры первой, второй и третьей группы показывают температуру более 400 °С, после чего температура продолжает медленно увеличиваться, и через несколько часов, например через 2-3 часа, происходит быстрое увеличение температуры, это означает, что имеет место боковое проплавление корпуса реактора и
10 двухстадийный процесс поступления расплава (сначала вытекают жидкие металлы, затем вытекают жидкие оксиды), и, следовательно, воду из шахт внутрикорпусных устройств и блока защитных труб подают с проектной (предварительно заданной) задержкой, например с задержкой от трёх до четырёх часов, обеспечив подтверждение того, что расплав растворил
15 наполнитель и произошла инверсия компонентов кориума (оксиды вверху, а металлы внизу);

 б) если после разрушения корпуса реактора датчики температуры первой, второй и третьей группы показывают температуру более 400 °С, после чего температура начинает сразу быстро равномерно или скачкообразно
20 повышаться, это означает, что имеет место одностадийный процесс поступления расплава (расплав металлов выливается вместе с расплавом оксидов), и следовательно, воду из шахт внутрикорпусных устройств и блока защитных труб подают раньше по времени, примерно, в интервале от 30 минут до одного часа с момента поступления расплава, т.к. наполнитель растворяется
25 достаточно быстро, а также быстро происходит инверсия металлов и оксидов, в течение, порядка, 30 минут.

Таким образом, по показаниям датчиков температуры первой, второй и третьей группы включается таймер задержки подачи воды на поверхность расплава из шахт ревизии внутрикорпусных устройств и блока защитных труб

ядерного реактора, после чего осуществляется подача (2) охлаждающей жидкости внутрь корпуса ловушки расплава. Время задержки может быть установлено от 30 минут до 4 часов. Время задержки определяют с учетом длительности истечения оксидной части расплава из корпуса реактора (при
5 двухстадийном струйном истечении из отверстия в разрушенной боковой поверхности корпуса реактора). Кроме того, для установки времени задержки, как правило, учитывают объём жертвенной стали и жертвенных оксидов в наполнителе, которые необходимы для перевода высокотемпературного и химически агрессивного расплава активной зоны в стабилизированное
10 состояние. Это позволяет обеспечить охлаждение расплава без разрушения корпуса ловушки расплава и без дополнительного разрушения тепловым излучением фермы-консоли и направляющей плиты.

Важным моментом обеспечения пассивной безопасности расплава является инверсия его оксидных и металлических компонентов, которая
15 происходит по мере расплавления и растворения наполнителя в расплаве активной зоны из-за уменьшения плотности оксидной части расплава по отношению к его металлической части. В результате инверсии оксидная ураносодержащая часть расплава всплывает вверх, а металлическая часть расплава опускается. Инверсия компонентов расплава позволяет решить две
20 задачи:

1. обеспечить выравнивание теплового потока от расплава активной зоны через корпус ловушки расплава к воде, при которой первоначальное распределение теплового потока с максимумом неравномерности в зоне
расположения расплава стали, находящейся над расплавом оксидов,
25 сглаживается и выравнивается по высоте корпуса ловушки после всплытия ураносодержащих оксидов над расплавом стали. Выравнивание теплового потока после инверсии обеспечивается, в основном, за счёт разницы теплофизических свойств расплава оксидов и расплава металлов.

2. обеспечить прямое охлаждение зеркала расплава водой для подавления аэрозольной активности расплава и теплового излучения с зеркала расплава на расположенное выше оборудование корпуса ловушки, на ферму-консоль и направляющую плиту, удерживающую на себе днище корпуса реактора с обломками активной зоны и внутрикорпусных устройств.

В процессе взаимодействия расплава активной зоны с наполнителем над зеркалом расплава образуется шлаковая шапка из лёгких оксидов наполнителя. Шлаковая шапка уменьшает взаимодействие открытой жидкометаллической поверхности ванны расплава с водяным паром с образованием водорода.

Дополнительно, шлаковая шапка уменьшает тепловое излучение со стороны зеркала расплава, направленное на расположенные выше элементы оборудования. По мере охлаждения шлаковой шапки, на ней образуется корка. Образование шлаковой шапки и корки определяют (3) с помощью датчиков температуры первой и второй группы, которые отображают периодические колебания температуры, а именно: если размер корки увеличивается, это приводит к небольшому снижению температуры, если корка разрушается, это приводит к резкому увеличению температуры из-за выброса газов и аэрозолей. Последующая подача воды на поверхность расплава понижает его поверхностную температуру. Работоспособные датчики температуры, расположенные на каждом из трех уровней на ловушке расплава, отображают данные о снижении температуры после начала подачи воды на поверхность расплава из шахт ревизии внутрикорпусных устройств и блока защитных труб. По таким показаниям датчиков температуры, расположенных на трёх уровнях (по снижению температуры) определяют (4) время прекращения выхода аэрозолей, а именно: вода, поступившая на поверхность расплава, блокирует выход аэрозолей и теплового излучения, а также быстро охлаждает выше расположенное оборудование, и стабилизирует его механические характеристики, следовательно, это приводит к снижению температуры.

Время завершения сорбции пара и образования водорода определяют (5) по показаниям датчиков температуры, расположенных на трёх уровнях. Эти показания совпадают с прекращением выхода аэрозолей и началом водяного охлаждения зеркала расплава.

5 Затем по показаниям всех работоспособных датчиков температуры, определяют (6) время стабилизации процессов охлаждения расплава и определяют (7) время перехода этих процессов в квазистационарный режим, а именно: если датчики температуры отображают постоянную температуру с последующим снижением температуры в ходе постепенного охлаждения
10 расплава, это указывает на то, что происходит процесс стабильного охлаждения расплава, при котором, по мере снижения остаточного энерговыделения, происходит снижение средней температуры расплава, его фиксация и постепенный переход из жидкой фазы в твёрдую.

Оставшийся расплав в днище корпуса реактора и само днище также
15 постепенно охлаждаются. Стабилизация и снижение температуры диагностируются датчиками температуры, которые расположены на третьем уровне и показывают температуру парогазовой среды под направляющей плитой. На эти показания влияют тепловые потоки от переизлучения со стороны горячих поверхностей внутренних элементов фермы-консоли и
20 нижней плоскости направляющей плиты, чем эти переизлучения меньше, тем ниже температура показаний датчиков третьей группы, тем холоднее поверхности фермы-консоли и направляющей плиты, тем ниже температура самой направляющей плиты и остатков расплава активной зоны, находящихся на ней. По показаниям датчиков температуры третьей группы увеличивают или
25 уменьшают (8) объем подачи воды в ловушку расплава после завершения подачи воды из шахт ревизии внутрикорпусных устройств и блока защитных труб, а именно: если после прекращения подачи воды из шахт ревизии внутрикорпусных устройств и блока защитных труб температура начинает повышаться, то увеличивают объем подачи воды в корпус ловушки расплава,

если температура не повышается, то уменьшают, либо полностью прекращают подачу воды в корпус ловушки расплава.

По показаниям датчиков-уровнемеров (13) увеличивают или уменьшают (9) объем подачи воды с учетом минимального и максимального уровней воды в шахте реактора. Уровни воды связаны с уровнями, на которых находятся фланец корпуса ловушки расплава и основание фермы-консоли, а именно: если уровень воды ниже уровня фланца корпуса, тогда увеличивают объем подачи воды, если уровень воды находится на уровне основания фермы-консоли, тогда его уменьшают, либо полностью прекращают подачу воды в корпус ловушки расплава.

Как видно на фиг.2 и фиг.3, система контроля охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора содержит первую, вторую, третью группы датчиков (10, 11, 12) температуры и группу датчиков-уровнемеров (13), объединенных в два канала (14), и соединенных с оборудованием (15) управления, на рабочих органах (16) каждого датчика температуры установлены герметичные концевики (17), закрытые защитными негерметичными колпаками (18), первая группа датчиков (10) температуры установлена над зеркалом (19) расплава внутри корпуса (20) ловушки (21) расплава, а их рабочие органы (16) направлены к зеркалу (19) расплава, вторая группа датчиков (11) температуры установлена между корпусом (20) ловушки (21) расплава и фермой-консолью (22), третья группа датчиков (12) температуры установлена под направляющей плитой (23), группа датчиков-уровнемеров (13) установлена под фермой-консолью (22) вдоль корпуса (20) ловушки (21) расплава в зоне её наружного водяного охлаждения.

В момент разрушения корпуса (24) реактора расплав (25) активной зоны, под действием гидростатического и избыточного давлений, начинает поступать во внутренний корпус (20) ловушки (21) расплава и входит контакт с наполнителем (26).

Наполнитель (26) обеспечивает объемное рассредоточение расплава (25) кориума в пределах ловушки (21), и предназначен для доокисления кориума и его разбавления в целях уменьшения объемного энерговыделения и увеличения поверхности теплообмена энерговыделяющего кориума с наружным слоем ловушки (21) расплава, а также способствует созданию условий для всплытия топливосодержащих фракций кориума над слоем стали. Наполнитель (26) может быть выполнен из стальных и оксидных компонентов, содержащих оксиды железа, алюминия, циркония, с каналами для перераспределения кориума не только в цилиндрической части, но и в донном коническом объеме.

Стальные и оксидные компоненты скомплектованы в кассеты цилиндрической формы. Как правило, наполнитель, по меньшей мере, содержит первую кассету, установленную на днище корпуса ловушки, вторую кассету, расположенную над первой кассетой, и третью кассету, установленную над второй кассетой. Третья кассета, в свою очередь, может состоять из нескольких кассет, установленных друг на друге.

Фактически, три группы датчиков (10, 11, 12) температуры установлены на трех уровнях, при этом, первая группа датчиков (10) температуры установлена внутри корпуса (20) ловушки (21) расплава, а вторая и третья группы датчиков (11, 12) температуры установлены над корпусом (20) ловушки (21) расплава.

Первая группа датчиков (10) температуры, расположенных на самом близком расстоянии от зеркала (19) расплава и шлаковой шапки (27), обеспечивает контроль температуры. Над этими датчиками температуры располагается тепловая защита (28), которая обеспечивает их защиту от воздействия стекающего расплава и летящих предметов. Рабочие органы (16) этих датчиков (10) температуры направлены в сторону расплава (25). Первая группа датчиков (10) температуры перестает функционировать после образования зеркала (19) расплава в корпусе (20) ловушки (21), так как к этому моменту тепловое излучение со стороны зеркала (19) расплава начинает снизу

плавить тепловую защиту (28). Повышение температуры зеркала расплава до температуры плавления тепловой защиты указывает на то, что к этому моменту времени произошла реакция между основной массой расплава и наполнителем, и кроме того, произошел переход на квазистационарный режим теплопередачи к охлаждающей жидкости через корпус ловушки, а также теплового излучения к вышерасположенным элементам оборудования ловушки (21) расплава, фермы-консоли (22) и направляющей плиты (23).

Вторая группа датчиков (11) температуры, установленных между корпусом (20) ловушки расплава и фермой-консолью (22), также обеспечивает контроль температуры. Эти датчики (11) температуры расположены в зоне, не защищенной тепловыми экранами и тепловыми защитами. Вторая группа датчиков (11) температуры функционирует в зависимости от характера поступления расплава активной зоны из корпуса реактора в ловушку расплава: при быстром неосесимметричном поступлении расплава жидкой стали, например, в течение от 30 до 60 секунд массой, порядка, 60 - 100 тонн, или при медленном неосесимметричном поступлении расплава жидких оксидов в смеси с некоторым количеством жидкой стали в течение, например, 2-3 трёх часов массой, порядка, 90 - 130 тонн, происходит частичное расплавление (отказ) некоторых датчиков температуры из второй группы. Но некоторые датчики (11) температуры могут продолжить работу и после завершения неосесимметричного истечения расплава из корпуса реактора, как наиболее тяжёлого для работоспособности датчиков второй группы. По показаниям этих датчиков температуры определяют один из важнейших параметров - время начала разрушения днища корпуса реактора, т.е., фактически, определяют начало истечения расплава, а также последующее состояние парогазовой среды над поверхностью расплава, или его коркой. На основании этих данных включается таймер для автоматической подачи охлаждающей жидкости с заранее установленной задержкой. Охлаждающая жидкость подается из шахт ревизии внутрикорпусных устройств и блока защитных труб внутрь корпуса

ловушки для охлаждения шлаковой шапки и находящегося под ней зеркала расплава активной зоны.

Третья группа датчиков (12) температуры, установленных на самом близком расстоянии к корпусу (20) реактора, также обеспечивает контроль температуры. Эти датчики (12) температуры установлены в защищенной, охлаждаемой зоне, расположенной под направляющей плитой (23), и сохраняют работоспособность в течение всего времени управления охлаждением расплава активной зоны в корпусе ловушки. По показаниям этих датчиков (12) определяют один из важнейших параметров - время начала разрушения днища корпуса реактора, т.е., фактически определяют время начала истечения расплава, и последующее состояние парогазовой среды над поверхностью расплава. На основании этих данных включается таймер для автоматической подачи охлаждающей жидкости с предварительно заданной задержкой. Охлаждающая жидкость подается из шахт ревизии внутрикорпусных устройств и блока защитных труб внутрь корпуса ловушки для охлаждения расплава активной зоны. Кроме того, по показаниям этих датчиков фиксируют формирование шлаковой шапки над поверхностью зеркала расплава, определяют время начала образования корки на поверхности расплава, получают информацию о прекращении выхода аэрозолей и завершении процесса сорбции пара и образования водорода.

Группа датчиков-уровнемеров (13), установленная, по меньшей мере, на двух внешних уровнях, расположенных с внешней стороны корпуса (20) ловушки (21) расплава в зоне охлаждения корпуса (20), обеспечивает контроль уровня охлаждающей жидкости в шахте реактора. Эта группа датчиков-уровнемеров (13) расположена в защищённой охлаждаемой зоне под фермой-консолью (22). По показаниям датчиков-уровнемеров (13) определяют уровень залива шахты реактора водой, т.е., по этим показаниям подтверждается проектное функционирование системы охлаждения ловушки, или проводится корректировка работы этой системы.

Применение вышеописанного способа охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора и системы контроля охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора позволило повысить эффективность охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора за счет снятия тепловой нагрузки с
5 зеркала расплава, что, в свою очередь, позволило полностью исключить вероятность парового взрыва при выполнении работ по отводу тепла от расплава, и, следовательно, повысить безопасность АЭС.

Источники информации:

1. Патент КНР №CN106651217, МПК G21D3/06, приоритет от 06.01.2017

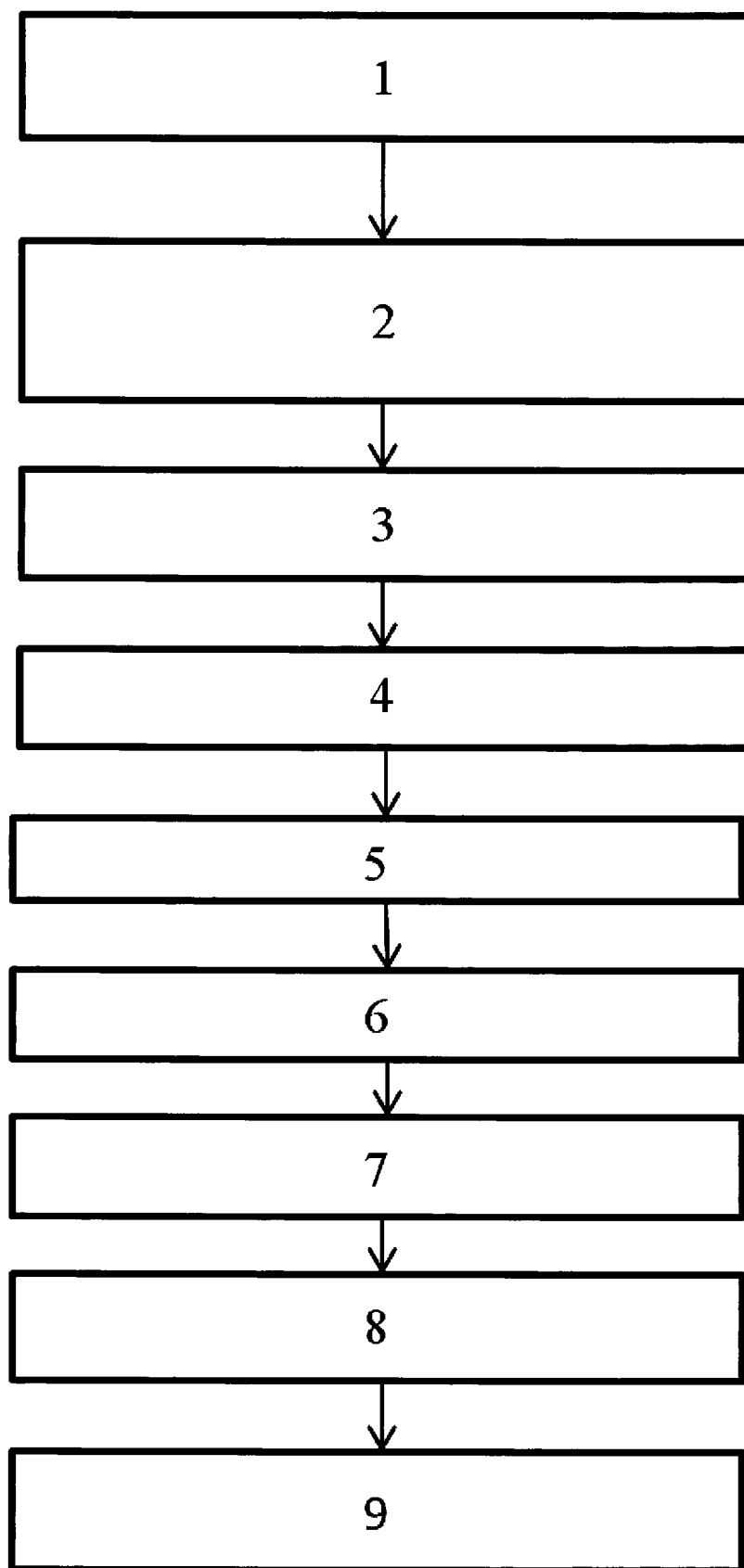
10 г.

Формула изобретения

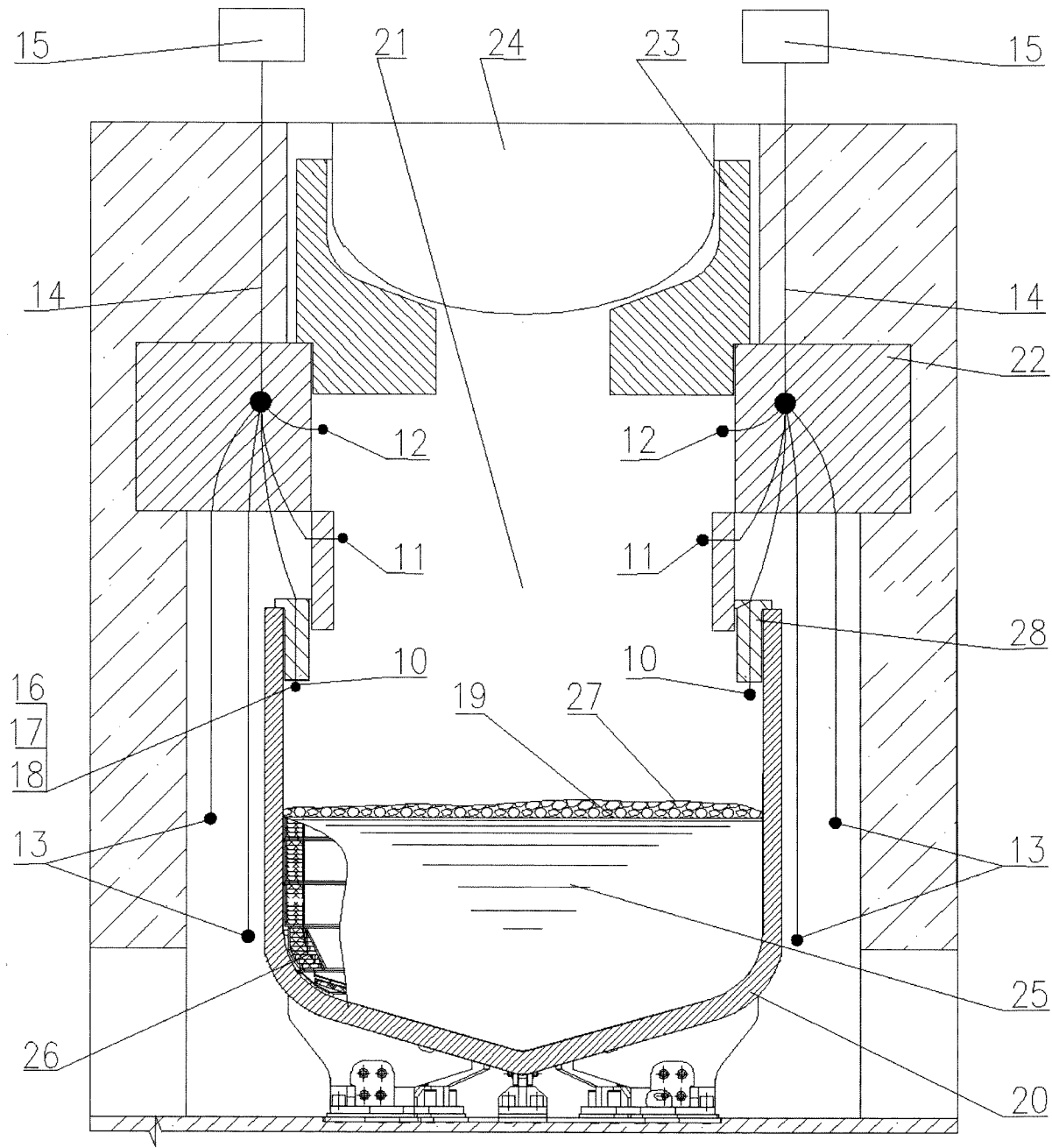
1. Способ охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора, заключающийся в определении, после разрушения расплавом активной зоны
5 корпуса ядерного реактора, местоположения расплавленных обломков активной зоны и определении состояния проплавления активной зоны по информации, полученной от датчиков температуры, подаче и регулировке объема подачи охлаждающей жидкости на расплав, отличающийся тем, что после разрушения расплавом активной зоны корпуса ядерного реактора,
10 определяют степень разрушения корпуса ядерного реактора и время начала истечения расплава из корпуса ядерного реактора в ловушку расплава, затем подают охлаждающую жидкость внутрь корпуса ловушки расплава с заранее установленной задержкой по времени, из шахт ревизии внутрикорпусных устройств и блока защитных труб ядерного реактора, после чего определяют
15 условия образования шлаковой шапки над поверхностью зеркала расплава, определяют время начала образования корки на поверхности расплава, определяют время прекращения выхода аэрозолей, определяют время завершения сорбции пара и время образования водорода, определяют время стабилизации процессов охлаждения расплава и время выхода этих процессов в
20 квазистационарный режим, затем регулируют объем подачи охлаждающей жидкости с учетом теплофизических параметров сред в герметичном объеме контайнмента, после чего регулируют объем подачи охлаждающей жидкости с учетом минимального и максимального уровней воды в шахте реактора.

2. Система контроля охлаждения расплава активной зоны ядерного
25 реактора, содержащая датчики температуры, соединенные с оборудованием управления, отличающаяся тем, что дополнительно содержит датчики-уровнемеры, установленные под фермой-консолью вдоль корпуса ловушки расплава в зоне её наружного водяного охлаждения, датчики температуры разделены на первую, вторую и третью группы, при этом первая группа

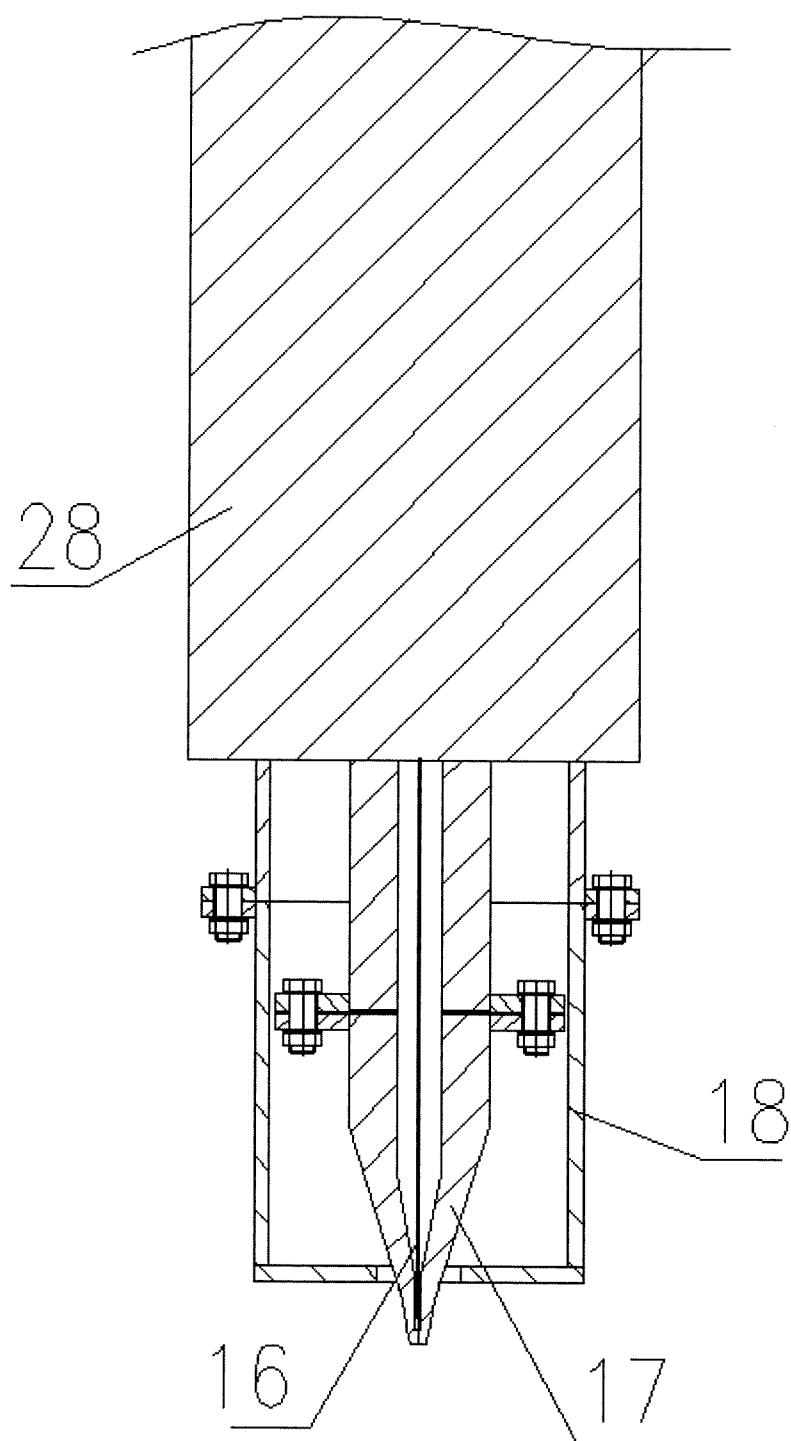
датчиков температуры установлена над зеркалом расплава внутри корпуса ловушки расплава, а их рабочие органы направлены к зеркалу расплава, вторая группа датчиков температуры установлена между корпусом ловушки расплава и фермой-консолью, третья группа датчиков температуры установлена под направляющей плитой, при этом все датчики температуры и датчики-уровнемеры объединены в два канала, а на рабочих органах каждого датчика температуры установлены герметичные концевики, покрытые защитными негерметичными колпаками.



Фиг.1



Фиг.2



Фиг.3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/RU 2018/000897

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G21C 15/18 (2006.01); G21C 17/022 (2006.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G21C 9/00, 9/016, 15/00, 15/18, 17/00, 17/02, 17/022

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

PatSearch (RUPTO Internal), USPTO, PAJ, Espacenet, Information Retrieval System of FIPS

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 106651217 A (CHINA NUCLEAR POWER DESIGN INST) 10.05.2017	1-2
A	RU 2514419 C2 (OTKRYTOE AKTSIONERNOE OBSHESTVO "VOSTOCHNO-EVROPEISKY GOLOVNOI NAUCHNO-ISSLEDOVATELSKY I PROEKTNY INSTITUT ENERGETICHESKIKH TEKHNOLGY") 27.04.2014	1-2
A	RU 100328 U1 (OTKRYTOE AKTSIONERNOE OBSHESTVO "SANKT-PETERBURGSKY NAUCHNO-ISSLEDOVATELSKY I PROEKTNO-KONSTRUKTORSKY INSTITUT "ATOMENERGOPROEKT") 10.12.2010	1-2
A	EP 2650882 A2 (GE-HITACHI NUCLEAR ENERGY, AMERICAS EEC) 16.10.2013	1-2
A	CN 107808230 A (SHANGHAI NUCLEAR ENGINEERING RESEARCH & DESIGN INSTITUTE CO., LTD. 16.03.2018	1-2



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

13 July 2019 (13.07.2019)

Date of mailing of the international search report

11 July 2019 (11.07.2019)

Name and mailing address of the ISA/
RU

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

ОТЧЕТ О МЕЖДУНАРОДНОМ ПОИСКЕ

Номер международной заявки

PCT/RU 2018/000897

A. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕДМЕТА ИЗОБРЕТЕНИЯ

G21C 15/18 (2006.01)

G21C 17/022 (2006.01)

Согласно Международной патентной классификации МПК

B. ОБЛАСТЬ ПОИСКА

Проверенный минимум документации (система классификации с индексами классификации)

G21C 9/00, 9/016, 15/00, 15/18, 17/00, 17/02, 17/022

Другая проверенная документация в той мере, в какой она включена в поисковые подборки

Электронная база данных, использовавшаяся при поиске (название базы и, если, возможно, используемые поисковые термины)

PatSearch (RUPTO Internal), USPTO, PAJ, Espacenet, Information Retrieval System of FIPS

C. ДОКУМЕНТЫ, СЧИТАЮЩИЕСЯ РЕЛЕВАНТНЫМИ:

Категория*	Цитируемые документы с указанием, где это возможно, релевантных частей	Относится к пункту №
A	CN 106651217 A (CHINA NUCLEAR POWER DESIGN INST) 10.05.2017	1-2
A	RU 2514419 C2 (ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКИЙ ГОЛОВНОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ") 27.04.2014	1-2
A	RU 100328 U1 (ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ "АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ") 10.12.2010	1-2
A	EP 2650882 A2 (GE-HITACHI NUCLEAR ENERGY, AMERICAS LLC) 16.10.2013	1-2
A	CN 107808230 A (SHANGHAI NUCLEAR ENGINEERING RESEARCH & DESIGN INSTITUTE CO., LTD.) 16.03.2018	1-2



последующие документы указаны в продолжении графы C.



данные о патентах-аналогах указаны в приложении

* Особые категории ссылочных документов:

“А” документ, определяющий общий уровень техники и не считающийся особо релевантным

“Е” более ранняя заявка или патент, но опубликованная на дату международной подачи или после нее

“L” документ, подвергающий сомнению притязание(я) на приоритет, или который приводится с целью установления даты публикации другого ссылочного документа, а также в других целях (как указано)

“О” документ, относящийся к устному раскрытию, использованию, экспонированию и т.д.

“Р” документ, опубликованный до даты международной подачи, но после даты испрашиваемого приоритета

“Т”

более поздний документ, опубликованный после даты международной подачи или приоритета, но приведенный для понимания принципа или теории, на которых основывается изобретение

“Х”

документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска; заявленное изобретение не обладает новизной или изобретательским уровнем, в сравнении с документом, взятым в отдельности

“У”

документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска; заявленное изобретение не обладает изобретательским уровнем, когда документ взят в сочетании с одним или несколькими документами той же категории, такая комбинация документов очевидна для специалиста

“&”

документ, являющийся патентом-аналогом

Дата действительного завершения международного поиска

13 июля 2019 (13.07.2019)

Дата отправки настоящего отчета о международном поиске

11 июля 2019 (11.07.2019)

Наименование и адрес ISA/RU:

Федеральный институт промышленной собственности,
Бережковская наб., 30-1, Москва, Г-59,
ГСП-3, Россия, 125993
Факс: (8-495) 531-63-18, (8-499) 243-33-37

Уполномоченное лицо:

А. Щеголева

Телефон № 8(495) 531-64-81