

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **047072**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2024.05.29**

(21) Номер заявки  
**202391589**

(22) Дата подачи заявки  
**2021.12.29**

(51) Int. Cl. **G21C 15/00** (2006.01)  
**G21C 17/10** (2006.01)  
**G06F 30/17** (2020.01)

---

(54) **СИСТЕМА ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ИЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЪЕМА ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ И СПОСОБ ЕЕ МОНИТОРИНГА**

---

(31) **2020143962**

(32) **2020.12.30**

(33) **RU**

(43) **2023.08.18**

(86) **PCT/RU2021/000619**

(87) **WO 2022/146189 2022.07.07**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
"АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ";  
ЧАСТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ  
НАУЧНОГО РАЗВИТИЯ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ "НАУКА  
И ИННОВАЦИИ" (ЧАСТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ "НАУКА И  
ИННОВАЦИИ") (RU)**

(72) Изобретатель:

**Безлепкин Владимир Викторович,  
Крекунов Олег Петрович, Колесник  
Илья Михайлович, Иванова Марина  
Владимировна, Игнатьев Алексей  
Алексеевич, Сергеев Александр  
Юрьевич (RU)**

(74) Представитель:

**Снегов К.Г. (RU)**

(56) **RU-C2-2595639  
RU-U1-85029  
RU-C1-2302674  
RU-C1-2082226  
WO-A1-2017028201  
WO-A1-2016089249  
CN-A-105070335**

(57) Изобретение относится к средствам мониторинга системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки водо-водяного энергетического реактора. Способ включает обследование внутренних областей отдельных участков трубопроводов с помощью средств визуального контроля; определяют дополнительное гидравлическое сопротивление в трубопроводе на недоступном участке путем исследования режима принудительной циркуляции контура. Причем определяют долю заблокированных трубок от их общего числа в теплообменнике и путем обработки полученных данных определяют состояние системы пассивного отвода тепла. Устройство включает по меньшей мере один контур циркуляции охлаждающей воды, а также дополнительно содержит нагревательный бачок, частично заполненный водой, с электронагревательными элементами, линию слива, включающую бак для приема сливаемой воды, и измерительные средства. Техническим результатом является повышение безопасности при эксплуатации АЭС.

**B1**

**047072**

**047072**

**B1**

### **Область техники**

Изобретение относится к области атомной энергетики, а именно к системам пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки водо-водяного энергетического реактора (СПОТ 30), и предназначено для определения работоспособности системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки водо-водяного энергетического реактора и предотвращения возникновения аварийных ситуаций на атомных электростанциях.

### **Уровень техники**

Из уровня техники известно множество конструкций систем отвода тепла из защитной оболочки реактора с использованием естественной циркуляции тепла.

В патенте РФ RU 2302674, G21C 9/00, 10.07.2007 раскрыта система отвода тепла из защитной оболочки, содержащая смонтированный под защитной оболочкой теплообменник, вход и выход которого пропущены через защитную оболочку и подключены к замкнутому контуру циркуляции легкокипящего теплоносителя, включающему турбину с электрогенератором, расположенные под защитной оболочкой энергоблок с парогенератором и установки для обеспечения безопасности энергоблока, одна из которых имеет гидроустройство и пароводяную турбину. Теплообменник установлен под куполом защитной оболочки и выполнен в виде двухъярусно расположенных кольцеобразных труб, соединенных между собой С-образными оребренными трубками, концы которых направлены к стенке защитной оболочки и охватывают гидроустройство установки для обеспечения безопасности энергоблока.

В патенте РФ на полезную модель RU 85029, G21C 15/18, 20.07.2009 раскрыта система, содержащая контур циркуляции теплоносителя, включающий по крайней мере один теплообменник, размещенный внутри объема защитной оболочки, и емкость с запасом теплоносителя, установленную выше теплообменника вне объема защитной оболочки, соединенные между собой подводным и отводящим трубопроводами. Система также снабжена пароприемным устройством, установленным в емкости с запасом теплоносителя, гидравлически связанным с последней и соединенным с отводящим трубопроводом.

Наиболее близким аналогом заявленного изобретения является система, описанная в патенте РФ RU 2595639, G21C 15/00, 27.06.2016. Система содержит смонтированный под защитной оболочкой теплообменник. Вход и выход теплообменника пропущены через защитную оболочку и подключены к замкнутому контуру циркуляции легкокипящего теплоносителя. Контур циркуляции легкокипящего теплоносителя включает турбину с электрогенератором, энергоблок с парогенератором и установки для обеспечения безопасности энергоблока. Одна из установок имеет гидроустройство и пароводяную турбину. Энергоблок с парогенератором и установки для обеспечения безопасности энергоблока расположены под защитной оболочкой. Теплообменник установлен под куполом защитной оболочки. Теплообменник выполнен в виде двух ярусно расположенных кольцеобразных труб, соединенных между собой С-образными оребренными трубками. Концы трубок направлены к стенке защитной оболочки и охватывают гидроустройство установки для обеспечения безопасности энергоблока.

### **Сущность изобретения**

Задачей заявленного изобретения является создание способа и устройства корректного определения работоспособности системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки водо-водяного энергетического реактора.

Технический результат от использования данного изобретения заключается в обеспечении и ускорении корректного определения работоспособности системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки водо-водяного энергетического реактора и предотвращения возникновения аварийных ситуаций на атомных электростанциях, а следовательно - в повышении безопасности при эксплуатации АЭС, а также в расширении функциональных возможностей аналога.

Данный технический результат достигается за счет использования обработки данных мониторинга системы, а также за счет внесения изменений в конструкцию системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки водо-водяного энергетического реактора, позволяющих проводить мониторинг системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки.

В одном из предпочтительных вариантов реализации заявленного изобретения предложен способ мониторинга системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки, характеризующийся тем, что: проводят визуальный осмотр системы касательно наличия внешних повреждений; контур системы пассивного отвода тепла делят на два участка: доступный и недоступный для проверки средствами визуального контроля; проводят обследование внутренних областей отдельных участков трубопроводов с помощью специальных средств визуального контроля; определяют дополнительное гидравлическое сопротивление в трубопроводе на недоступном участке путем исследования режима принудительной циркуляции контура; определяют долю заблокированных трубок от их общего числа в теплообменнике; проводят обработку полученных на предыдущих этапах данных и определяют состояние системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки.

Дополнительно может быть проведена оценка вклада коррозионной составляющей.

Обработка полученных на предыдущих этапах данных и определение состояния системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки могут быть проведены с использованием 3D-моделирования.

Устройство для осуществления способа мониторинга системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки, включает по меньшей мере один контур циркуляции охлаждающей воды, содержащий: теплообменник, размещенный внутри объема защитной оболочки и включающий верхний и нижний коллекторы, соединенные теплообменными трубками, подъемный и опускной трубопроводы, связанные с теплообменником, емкость запаса охлаждающей воды, размещенную выше теплообменника вне объема защитной оболочки и соединенную с опускным трубопроводом, паросбросное устройство, соединенное с подъемным трубопроводом, размещенное в емкости запаса воды и гидравлически связанное с последней, отличающаяся тем, что содержит дополнительно: нагревательный бачок, частично заполненный водой, с электронагревательными элементами, линию слива, включающую бак для приема сливаемой из системы воды, измерительные средства.

#### Краткое описание чертежей

Фиг. 1 - зависимость перепада давления на недоступном участке от расхода воды в контуре при различных значениях дополнительного гидравлического сопротивления.

Фиг. 2 - предельная кривая в координатах дополнительного гидравлического сопротивления контура и доли "отключенной" поверхности теплообмена.

Фиг. 3 - геометрия расчетной области.

Фиг. 4 - поперечный разрез расчетной области (вертикальная часть трубок ТО).

Фиг. 5 - нижняя часть расчетной области, нумерация трубок ТО.

Фиг. 6 - поля температуры для двух различных постановок задачи.

Фиг. 7 - поля температуры для двух различных постановок задачи.

Фиг. 8 - поля скорости для двух различных постановок задачи.

Фиг. 9 - зависимость перепада температур в трубках ТО от общего расхода в системе.

#### Подробное описание изобретения

Ниже будут рассмотрены некоторые термины, которые в дальнейшем будут использоваться при описании изобретения.

АЭС (атомная электростанция) - ядерная установка, использующая для производства электрической (и в некоторых случаях тепловой) энергии ядерный реактор (реакторы) и содержащая комплекс необходимых сооружений и оборудования.

СПОТ (ЗО) - система пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки водородного энергетического реактора АЭС.

БАОТ - бак аварийного отвода тепла.

ТО - теплообменник.

Трёхмерная модель (3D модель) - это объемное цифровое изображение объекта. Создание 3D моделей происходит в специальном программном обеспечении для 3D моделирования.

В данном изобретении технический результат от его использования, в обеспечении и ускорении корректного определения работоспособности системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки водо-водяного энергетического реактора и предотвращения возникновения аварийных ситуаций на атомных электростанциях, а следовательно - в повышении безопасности при эксплуатации АЭС, а также в расширении функциональных возможностей аналога, достигается за счет использования обработки данных мониторинга системы, а также за счет внесения изменений в конструкцию системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки водородного энергетического реактора, позволяющих проводить мониторинг системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки.

Согласно предлагаемому изобретению, способ мониторинга системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки, характеризуется следующими операциями.

Проводят визуальный осмотр системы касательно наличия внешних повреждений.

Работоспособность (т.е., способность выполнять свои функции) СПОТ ЗО изначально устанавливается по результатам серии экспериментов и численных расчетов. По итогам транспортировки и монтажа элементов системы могут возникнуть отклонения характеристик системы от проектных значений. Например, повреждения трубопроводов и трубок ТО (разрушения, замятия) или их внутренние блокады (засоры, дефекты сварки). Кроме этого, с течением времени влияние на характеристики системы может начать оказывать коррозия материалов ее элементов. Во всех этих случаях работоспособности системы может быть нанесен ущерб. Таким образом, по итогам монтажа, а также после проведения ремонтных работ, связанных с заменой элементов системы, необходимо подтверждение работоспособности СПОТ ЗО.

Кроме чисто механических причин, отклонение характеристик системы от проектных значений могут вызвать коррозионные отложения на внутренних поверхностях трубок ТО, возникающие в процессе эксплуатации системы. Оценка вклада коррозионной составляющей в термическое сопротивление потоку тепла от воды в трубках теплообменника к парогазовой среде в контейнменте в проектном режиме работы системы: продукты коррозии в объеме и на поверхностях элементов системы представлены преимущественно в виде гематита:  $Fe_2O_3$ , толщина слоя гематита, накопленного на поверхностях элементов системы за проектный период эксплуатации (60 лет) составляет:  $\delta_H = 65 \times 10^{-9}$  м. Теплопроводящим свойствам

гематита присуща анизотропия. Минимальной является составляющая теплопроводности, измеренная параллельно оптической оси кристалла. Её величина составляет:

$\lambda_H = 12.1$  Вт/(м·К). Теплопроводность материала стенки трубок теплообменника составляет  $\lambda_w = 15.06$  Вт/(м·К), толщина стенок трубок теплообменника составляет:  $\delta_w = 3 \times 10^{-3}$  м. Уменьшением толщины стенок трубок за счет коррозии консервативно пренебрежем. Коэффициенты теплоотдачи от воды к стенкам трубок и от парогазовой среды к стенкам трубок в проектном режиме работы могут быть консервативно оценены следующим образом:  $\alpha_1 < 1000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и  $\alpha_2 < 600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Суммарное термическое сопротивление теплопередаче от парогазовой среды к воде может быть представлено в виде:

$$R_{\Sigma} = 1/\alpha_1 + 1/\alpha_2 + \delta_w/\lambda_w + \delta_H/\lambda_H$$

Термическое сопротивление слоя гематита:

$$R_H = \delta_H/\lambda_H$$

Вклад коррозионной составляющей в термическое сопротивление потоку тепла в проектном режиме работы системы может быть оценен отношением термических сопротивлений:

$$\varepsilon = R_H/R_{\Sigma}$$

Подставляя численные значения величин, получаем консервативную оценку:

$$\varepsilon < \frac{65 \cdot 10^{-9} / 12.1}{1/1000 + 1/600 + 3 \cdot 10^{-3} / 15.06 + 65 \cdot 10^{-9} / 12.1} \approx 1.85 \cdot 10^{-6}$$

Таким образом, влияние коррозии на показатели работы системы в течение проектного срока эксплуатации пренебрежимо мало.

Контур системы пассивного отвода тепла делят на два участка:

доступный и недоступный для проверки средствами визуального контроля.

Контур СПОТ 30 может быть разделен на два участка: доступный и недоступный для проверки средствами визуального контроля.

Проводят обследование внутренних областей отдельных участков трубопроводов с помощью специальных средств визуального контроля.

Наличие внешних повреждений может быть установлено путем визуального осмотра. На отдельных участках трубопроводов их внутренние области также могут быть обследованы с помощью специальных средств визуального контроля (мобильная дистанционно управляемая видеокамера). Это относится к участкам трубопроводов от среза трубы в баке до некоторого препятствия (задвижка, крутой гиб), мешающего продвижению через него камеры. Для остальных участков трубопровода, недоступных обследованию визуальными средствами, а также для трубок ТО, должны быть предусмотрены иные меры проверки отсутствия блокад в их внутренних областях.

Определяют дополнительное гидравлическое сопротивление в трубопроводе на недоступном участке путем исследования режима принудительной циркуляции контура.

Для определения дополнительного (по отношению к проектному) гидравлического сопротивления в трубопроводе на недоступном участке исследуется режим принудительной циркуляции контура с относительно большим расходом. Циркуляция создается с помощью подачи воздуха в вертикальную часть подъемного трубопровода.

Проводятся расчеты данного режима при различных значениях дополнительного сопротивления. По результатам расчетов строится диаграмма (т.е., набор графиков в общих осях), представляющая зависимости перепада давления на недоступном участке  $\Delta P$  от расхода воды в контуре  $G$  при различных значениях дополнительного гидравлического сопротивления  $\rho$  - от нулевого до максимального допустимого значения (см. фиг. 1), определяемого по предельной кривой (см. фиг. 2).

Во время гидравлических испытаний измеряются: расход воды в контуре и перепад давления на недоступном участке. Использование графиков указанных зависимостей позволяет по точке на плоскости  $\Delta P$  и  $G$ , соответствующей измеренным значениям этих величин, установить фактическое значение дополнительного гидравлического сопротивления контура.

Определяют долю заблокированных трубок от их общего числа в теплообменнике.

Для этого исследуется теплообмен между паровоздушной средой контейнента и водой, протекающей через ТО. Для проведения тепловых испытаний используется специально предназначенное для этого оборудование. Вода из БАОТ через трубопровод поступает в нагревательный бак с нагревательными элементами. В этом баке при работе системы происходит нагрев воды до температуры насыщения. Паровой объем этого нагревательного бака соединен с воздушным объемом БАОТ. Таким образом, при открытой задвижке на трубопроводе между водяными объемами БАОТ и нагревательного бака, последние представляют собой сообщающиеся сосуда. Идея заключается в обеспечении стабильности темпера-

туры горячей воды, поступающей в теплообменник, за счет кипения при постоянном давлении. Из нагревательного бака вода через трубопровод поступает в подъемный трубопровод СПОТ ЗО. Поскольку обе задвижки СПОТ ЗО закрыты, вода поступает на участок контура с ТО. В ТО вода охлаждается и поступает в линию слива, которая присоединена к опускному трубопроводу СПОТ ЗО. Из линии слива вода поступает в специальный накопительный бак, находящийся в помещении арматуры системы.

Таким образом, по сравнению со штатным режимом работы ТО, как движение воды через ТО, так и теплообмен со средой контейнента происходят в обратном направлении. А именно, вода движется через ТО сверху вниз и имеет более высокую температуру, чем среда в контейненте.

Проводятся расчеты данного режима при различных значениях числа трубок ТО, т.е., при различных значениях доли "работающей" площади теплообменной поверхности. По результатам расчетов строится серия диаграмм, представляющих зависимости перепада температуры  $\Delta T$  на теплообменнике от расхода воды  $G$  при различных относительных значениях "выключенной" доли площади теплообменной поверхности - от нуля до максимально допустимого значения, определяемого по предельной кривой (см. фиг. 2).

С помощью расчетных кодов проведены расчеты максимальной тяжелой аварии. В этих расчетах моделировалась работа СПОТ ЗО при наличии следующих деструктивных (т.е., ухудшающих показатели работы системы) факторов: 1) блокада трубопровода системы и 2) блокада части трубок теплообменника. Первый из упомянутых факторов моделируется дополнительным локальным гидравлическим сопротивлением контура циркуляции; второй - "выключением из работы" части трубок теплообменника.

На основании этих расчетов, в координатах коэффициента дополнительного гидравлического сопротивления контура  $\rho$  и доли "выключенной" из теплообмена площади поверхности ТО  $\Delta S$  строится предельная кривая. Предельная кривая представляет собой множество значений  $\rho$  и  $\Delta S$ , при которых достигается предельно допустимое значение давления под оболочкой во время тяжелой аварии. По отношению к последствиям тяжелой аварии, предельная кривая разделяет область всех значений  $\rho$  и  $\Delta S$  на подобласть допустимых (под кривой), и недопустимых (над кривой) значений - см. фиг. 2. Различные диаграммы указанной серии соответствуют различным значениям параметров, данные о которых должны быть получены в результате измерений. К таким параметрам относятся: температура воды на входе в теплообменник, температура воздуха в контейненте, температура и степень черноты внутренней облицовки стен контейнента, температура и степень черноты внешней поверхности трубок ТО, уровень воды в баке. Оценка зависимости результатов расчета от относительной влажности воздуха в контейненте показала, что влияние данного параметра допустимо не учитывать.

На этапе обработки результатов измерений из серии диаграмм выбирается такая, для которой значения параметров наиболее близки их измеренным значениям. Использование кривых на этой диаграмме позволяет по точке на плоскости  $\Delta T$  и  $G$ , соответствующей измеренным значениям этих величин, установить относительное значение "выключенной" доли площади теплообменной поверхности, а значит, и число заблокированных трубок теплообменника.

Проводят обработку полученных на предыдущих этапах данных и определяют состояние системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки.

Полученные в ходе испытаний данные по сопротивлению контура  $\rho$  и относительному значению "отключенной" теплообменной поверхности  $\Delta S$  должны быть соотнесены с предельной кривой (см. фиг. 2). В случае, если точка, соответствующая значениям этих величин, полученным в результате обработки данных измерений, находится ниже предельной кривой, то может быть сделан вывод о способности системы выполнять свой функции.

В случае неудовлетворительных, с точки зрения работоспособности системы, результатов испытаний возможно проведение дополнительного обследования трубок теплообменника с помощью тепловизора. Для этого в режиме тепловых испытаний (когда через трубки теплообменника протекает горячая вода) с помощью тепловизора проводится обследование трубок теплообменника с целью выявления участков с относительно низким выделением тепла. Наличие такого участка в трубке ТО являться свидетельством существования препятствий свободному протеканию жидкости через данную трубку.

Обработка полученных на предыдущих этапах данных и определение состояния системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки могут быть проведены с использованием 3D-моделирования.

В качестве примера приведено описание моделирования сопряженного теплообмена при свободной и смешанной конвекции участка теплообменника СПОТ ЗО.

Расчетная область ввиду симметричного расположения трубок теплообменника (ТО) представляет собой сегмент с одной целой трубкой типа 1 и две половины трубки ТО типа 2, которые окружены воздухом. На входные границы трубок ТО подается вода с заданной скоростью и температурой. Коллекторы, подводящие воду в трубки ТО, не учитываются. Геометрия расчетной области представлена ниже на рисунке фиг. 3. Также ниже на фиг. 4 представлен поперечный разрез расчетной области.

В табл. 1 представлены основные геометрические характеристики расчетной области.

Таблица 1

Геометрические характеристики расчетной области

Общая длина трубки ТО (с учетом изгибов), м	Длина вертикального участка трубок ТО, м	Внутренний диаметр трубки ТО, м	Внешний диаметр трубки ТО, м	Толщина трубки ТО, м
5,25	4,62	0,032	0,038	0,003

Внешние границы расчетной области в направлении оси z удалены на 3 калибра в нижней части и на 8 калибров в верхней части расчетной области.

Нагретая вода поступает в трубки ТО с заданной скоростью и температурой. Вода движется по трубкам ТО в противоположном направлении оси z (от верхней части расчетной области в нижнюю часть) под действием вынужденного течения и сил плавучести в поле силы тяжести. На выходной границе трубок задано избыточное нулевое давление. В случае возникновения обратного течения на выходных границах вода входит со средней температурой в выходном сечении трубки.

На границах раздела фаз, между воздухом и стальными трубками, а также стальными трубками и водой, задаются граничные условия 4 рода. Это означает равенство температур и тепловых потоков на границах раздела фаз.

Нагретые от воды стальные трубки ТО нагревают воздух, который в свою очередь под действием силы плавучести в поле силы тяжести поднимается вверх по направлению оси z. Происходит теплосъем с нагретых трубок ТО за счет свободной конвекции. На входных и выходных границах расчетной области для воздуха задано нулевое избыточное давление и температура воздуха  $T_{окр.ср.}=30^{\circ}\text{C}$ .

Рассмотрены два варианта течения воды в трубках ТО.

Вода поступает во все 3 трубки расчетной области.

В одну из трубок расчетной области нагретая вода не поступает.

Второй вариант имитирует возможную неработоспособность трубок ТО в случае засора, неправильного монтажа теплообменника-конденсатора и других возможных неполадок. Параметры для второго варианта расчета получены при условии, что максимальный возможный процент выхода из строя трубок ТО составляет 25% от общего количества трубок одного ТО СПОТ 30. При условии, что в одном теплообменнике-конденсаторе СПОТ 30 находится 132 трубки (100%), то минимально возможное количество трубок для ТО составит 99 трубок (75%). На фиг. 5 представлена принятая для удобства нумерация трубок в расчетной области. Отключенной трубкой в расчетах будет являться трубка под номером 3.

Основными параметрами, которые варьировались в расчетах это общий расход воды в системе, т.е. расход на весь ТО (132 трубки) и температура воды на входе в трубки ТО. При этом в вариантах расчета с отключенной трубкой проводился расчет скорости, в виду того, что общий расход воды в системе остается постоянным. В расчетах рассмотрен вариант температуры на входе  $T_{вх}$  в трубки ТО  $100^{\circ}\text{C}$ .

Скорости на входе в трубки получены из общего расхода в системе и количества трубок. Скорости на входе в трубки были получены из формулы:

$$V_{вх} = \frac{G/N}{\rho_{вх} \cdot S_{вх}}$$

где G - общий расход в системе [кг/с], N - количество трубок ТО,  $\rho_{вх}$  - плотность воды [кг/м<sup>3</sup>], S - площадь входного сечения [м<sup>2</sup>].

Радиационный теплообмен учитывается только в воздушной среде и стальных трубках ТО. Для расчетной области внутри трубок излучение не учитывается. Степень черноты внешних поверхностей трубок ТО и внешних границ расчетной области принималась равной  $\varepsilon=0.8$ .

Начальными условиями для воздушной среды являются: нулевое поле скорости и температура окружающей среды  $T_{окр.ср.}=30^{\circ}\text{C}$  Нулевое поле скорости для воды при температуре  $T_{вх}$ . Температура трубок принята как  $T_{вх}$  водной среды.

Течение и теплообмен в воздушной среде характеризуется числом Грасгофа Gr и для всех рассматриваемых режимах течения воздуха имеет порядок  $Gr \approx 1011$ , что является характерным значением для сводно-конвективного турбулентного течения. В связи с этим, свободно-конвективное течение вокруг трубок ТО является турбулентным и для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса была выбрана полуэмпирическая стандартная  $k-\varepsilon$  модель турбулентности с расширенными пристенными функциями. Силы плавучести учитываются в приближении Буссинеска.

Для учета переноса энергии излучением выбрана модель Surface-to-Surface (S2S, модель "поверхность-поверхность").

Для численного моделирования сопряженного теплообмена, свободной и смешанной конвекции была построена неструктурированная расчетная сетка размерностью 6,3 млн. ячеек.

Все расчеты проведены в нестационарной постановке. В основных расчетах шаг по времени принимался равным 0,5 с. Решение уравнений Навье-Стокса и конвективно-диффузионного переноса тепла осуществлялось с использованием метода Segregated Flow. Расчеты производились со вторым порядком точности дискретизации по пространству и времени. Задача считалась сошедшейся, когда средняя температура на выходе из трубок и на поверхности трубок ТО выходили на некое постоянное значение.

Ниже приведены результаты расчета для температуры на входе в трубки ТО 100°C и для разных массовых расходов. Ниже на фиг. 6-8 приведены поля скорости и температуры для одного из вариантов расчета с полным количеством трубок и вариант, когда в одну из трубок вода не подается, что имитирует неработоспособность трубки.

На фиг. 9 представлена зависимость перепада температур в трубках ТО от расхода воды в системе. Ниже в табл. 2 представлены удельные тепловые потоки на поверхностях трубок ТО, средние температуры, а также коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности трубки ТО.

Таблица 2

Результаты расчета при температуре воды на входе в трубки ТО 100°C

Расход, кг/с	$\Delta T$ , °C	Удельный тепловой поток $q$ (воздух), Вт/м <sup>2</sup>	Удельный тепловой поток $q$ (вода), Вт/м <sup>2</sup>	Средняя температура внешней поверхности трубки ТО, °C	Средняя температура внутренней поверхности трубки ТО, °C	Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ с внешней поверхности ТО, Вт/м <sup>2</sup> /K
100 %						
0,15	46,96	360	427	68,37	68,44	9,4
0,20	40,37	415	492	73,50	73,59	9,5
0,30	31,63	484	575	79,70	79,80	9,7
75 %						
0,15	42,16	432	512	72,26	72,35	10,2
0,20	35,82	486	578	76,87	76,97	10,4
0,30	27,30	557	662	82,49	82,61	10,6

Из табл. 2 видно, что при увеличении расхода в системе увеличивается и удельный тепловой поток на внутренней и внешней поверхности трубок. На фиг. 9 представлена зависимость перепада температур в трубках ТО от общего расхода в системе. Видно, что при увеличении расхода в системе перепад температур между входом и выходом падает.

Для температуры воды 100°C на входе отключение одной трубки из расчетной модели приводит к увеличению скорости в остальных трубках. Таким образом, температура воды на выходе из трубок выше и перепад температур для варианта с отключенной трубкой ниже, чем в варианте расчета со всеми работающими трубками ТО.

Для температуры воды на входе в ТО 100°C разница температур между двумя вариантами расчета (при полностью работающем теплообменнике-конденсаторе на 100% и при работающем частично на 75% площади трубок ТО) составляет порядка 5°C.

В одном из вариантов осуществления описываемого технического решения система пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки дополнительно содержит:

А) следующие измерительные средства для определения дополнительного гидравлического сопротивления в трубопроводе на недоступном участке путем исследования режима принудительной циркуляции контура.

Портативный ультразвуковой расходомер Fluxus ADM F601/ Диапазон скорости потока 0.01-25 м/с. Погрешность измерения объемного расхода 1% ИВ. Возможны два варианта установки расходомера.

Вариант с тарировкой. В этом варианте предполагаемое место установки расходомера во время испытаний - прямолинейный участок опускного трубопровода в помещении арматуры СПОТ 30. Выбор

именно опускного участка связан с тем, что при гидравлических испытаниях на подъемном участке реализуется двухфазный режим течения. Ввиду несоответствия фактических условий измерения расхода нормативным требованиям по установке расходомера (недостаточная длина прямолинейного участка), необходимо провести предварительную тарировку данного прибора для каждой петли системы. Тарировка проводится перед испытаниями с помощью второго (контрольного) расходомера, который устанавливается последовательно с первым, но в таком месте, где выполняются необходимые требования по его установке. Таким местом является участок опускного трубопровода системы в пространстве между оболочками. Тарировка заключается в следующем. В режиме гидравлических испытаний измеряется расход в нескольких точках рабочего диапазона расходов одновременно обоими приборами. На основании этих измерений строится тарировочная кривая, которая используется в дальнейшем при обработке результатов испытаний. Для измерений во время испытаний тарированный прибор устанавливается на то же самое место и в то же самое положение, которые он занимал во время тарировки. Установочное место расходомера должно быть зафиксировано во время тарировки и отмечено маркерами. Необходимо иметь ввиду, что тарировочные кривые для разных петель системы могут различаться, поскольку для разных петель различается геометрия участков, на которых устанавливается расходомер.

Вариант без тарировки. В этом варианте для проведения измерений во время испытаний расходомер устанавливается на участок опускного трубопровода между оболочками, т.е., на то самое место, которое в первом варианте использовалось для установки контрольного (тарирующего) прибора.

Воздушный компрессор производительностью 1000 л/мин (около 0.02 кг/с). Необходимым условием использования компрессора является отсутствие примесей, например, паров масла, в подаваемом в систему воздухе.

Воздушная линия, включающая указанный компрессор, средство измерения расхода воздуха и вентиль для плавной регулировки расхода воздуха. Линия монтируется к штуцеру в горизонтальной части линии байпаса задвижки АА802.

Дифференциальный манометр для измерения перепада давлений на недоступном участке контура циркуляции.

Для определения дополнительного гидравлического сопротивления в трубопроводе на недоступном участке путем исследования режима принудительной циркуляции контура:

1. Арматура системы и воздушной линии приводится в открытое состояние.
2. Включается воздушный компрессор.
3. Вентиль на воздушной линии открывается и устанавливается в положение, соответствующее значению расхода воды в контуре: 15-20 кг/с.
4. Контролируется расход воды в контуре с целью установления момента достижения стационара. Расчетное время выхода на стационар составляет: 50-100 с.
5. По достижению стационара измеряются: расход воздуха в воздушной линии, расход воды в контуре, уровень воды в баках СПОТ, перепад давления на недоступном участке.
6. Закрывается вентиль на воздушной линии.
7. Выключается воздушный компрессор.
8. Арматура системы и воздушной линии приводится в закрытое состояние.

Б) Для определения доли заблокированных трубок от их общего числа в теплообменнике в конструкцию СПОТ 30 включают:

1) нагревательный бачок, частично заполненный водой, с электронагревательными элементами с общим регулируемым уровнем мощности 0-75 кВт. Паровой объем бачка соединен трубопроводом с воздушным объемом БАОТ. Водяной объем бачка нагревателя соединен трубопроводом с байпасом задвижки подъемного трубопровода СПОТ 30.

2) Линия слива, включающая бак для приема сливаемой из системы воды и средства измерения расхода. Линия монтируется к штуцеру на опускном участке трубопровода системы.

3) Средства измерения температуры воды, а также вентиль на линии слива для плавной регулировки расхода воды.

4) Пирометр, который, вместе со средствами непосредственного измерения температуры поверхности трубок ТО и стен контейнента, служит для определения степени черноты указанных поверхностей.

5) Средства непосредственного измерения температуры поверхности трубок ТО и стен контейнента.

6) Тепловизор, служащий для дополнительных исследований в случае неудовлетворительных результатов основных испытаний.

Для определения доли заблокированных трубок от их общего числа в теплообменнике:

1. Открывается арматура, соединяющая БАОТ и электронагреватели.
2. Проводится измерение уровня воды в нагревательном баке. При значении уровня близком к номинальному, включаются электронагревательные элементы; общая мощность электронагревателей устанавливается на уровне: 75 кВт.

3. Периодически проводятся измерения температуры воды в нагревательном баке. При достижении значения температуры значения: 100°C арматура линии слива приводится в открытое состояние. Вентиль на линии слива устанавливается в положение, соответствующее расходу воды в линии слива: 0.2 кг/с.

4. Контролируются температура на входе и выходе ТО с целью установления момента достижения стационара. Расчетное время выхода на стационар от момента начала прогрева (включения электронагревателей) составляет приблизительно: 10000-12000 с.

5. По достижению стационара измеряются следующие параметры. Расход воды, уровень и температура воды в баках СПОТ, температура воды на входе и выходе ТО, температура воды за нагревателем, температура среды в контейменте, температура воды и уровень в нагревательном баке. Также должны быть измерены следующие параметры: температура поверхности трубок ТО - непосредственные (контактные) измерения и измерения с помощью пирометра (бесконтактные); температура поверхности стен контеймента - непосредственные (контактные) измерения и измерения с помощью пирометра (бесконтактные).

6. Выключаются электронагревательные элементы.

Арматура линии нагрева и линии слива приводится в закрытое состояние.

Специалисту в данной области, очевидно, что конкретные варианты осуществления мониторинга системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки и устройства для его осуществления были описаны здесь в целях иллюстрации, допустимы различные модификации, не выходящие за рамки и сущности изобретения.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки водо-водяного энергетического реактора, включающая по меньшей мере один контур циркуляции охлаждающей воды, содержащий: теплообменник, размещенный внутри объема защитной оболочки и включающий верхний и нижний коллекторы, соединенные теплообменными трубками, подъемный и опускной трубопроводы, связанные с теплообменником, емкость запаса охлаждающей воды, размещенную выше теплообменника вне объема защитной оболочки и соединенную с опускным трубопроводом, паросбросное устройство, соединенное с подъемным трубопроводом, размещенное в емкости запаса воды и гидравлически связанное с последней, отличающаяся тем, что содержит дополнительно: нагревательный бачок, частично заполненный водой, с электронагревательными элементами, водяной объем которого соединен трубопроводом с подъемным трубопроводом, а паровой объем - с воздушным объемом емкости запаса охлаждающей воды, дифференциальный манометр для измерения перепада давлений на недоступном участке контура циркуляции, линию слива, соединенную с баком аварийного отвода тепла и включающую бак для приема сливаемой из системы воды, средства измерения расхода воды в контуре, воздушный компрессор, воздушной линии, соединенной с опускным трубопроводом и включающей средство измерения расхода воздуха и вентиль для плавной регулировки расхода воздуха, пирометр, средства непосредственного измерения температуры поверхности трубок теплообменника и стен контеймента, тепловизор и средства измерения перепада давления, установленные на недоступном для проверки средствами визуального контроля участке контура системы.

2. Способ мониторинга системы по п. 1, характеризующийся тем, что:

проводят визуальный осмотр системы касательно наличия внешних повреждений;

контур системы пассивного отвода тепла делят на два участка: доступный и недоступный для проверки средствами визуального контроля;

проводят обследование внутренних областей отдельных участков трубопроводов с помощью мобильной дистанционно управляемой видеокамеры;

определяют дополнительное гидравлическое сопротивление в трубопроводе на недоступном участке путем исследования режима принудительной циркуляции контура, для чего приводят арматуру системы и воздушной линии в открытое состояние, включают воздушный компрессор и устанавливают вентиль на воздушной линии в положение, соответствующее значению постоянного расхода воды в контуре, контролируют расход воды в контуре с целью установления момента достижения стационара, по достижению стационара измеряются расход воздуха в воздушной линии, расход воды в контуре, уровень воды в баках системы и перепад давления на недоступном участке;

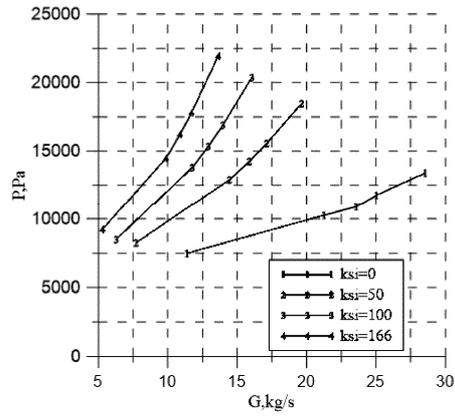
определяют долю заблокированных трубок от их общего числа в теплообменнике, для чего открывают арматуру, соединяющую бак аварийного отвода тепла и электронагреватели, проводят измерение уровня воды в нагревательном баке, при значении уровня, близком к номинальному, включаются электронагревательные элементы, периодически проводят измерения температуры воды в нагревательном баке, при достижении значения температуры 100°C приводят арматуру линии слива в открытое состояние, устанавливают вентиль на линии слива в положение, соответствующее определенному расходу воды, контролируют температуру на входе и выходе теплообменников с целью установления момента достижения стационара, по достижению стационара измеряют расход воды,

уровень и температуру воды в баках системы, температуру воды на входе и выходе теплообменников, температуру воды за нагревателем, температуру среды в контейменте, температуру и уровень воды в нагревательном баке, температуру поверхности трубок теплообменника и температуру поверхности стен контеймента;

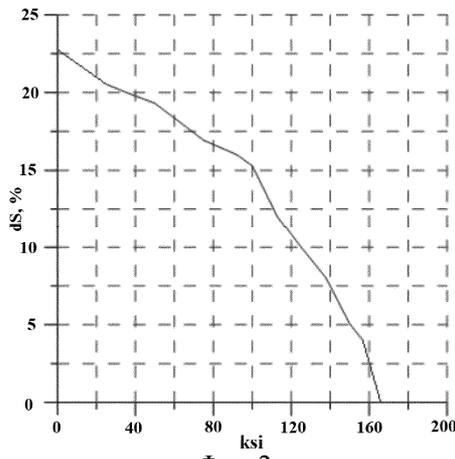
проводят обработку полученных на предыдущих этапах данных и определяют состояние системы пассивного отвода тепла из внутреннего объема защитной оболочки.

3. Способ по п.1, характеризующийся тем, что проводят оценку вклада коррозионной составляющей.

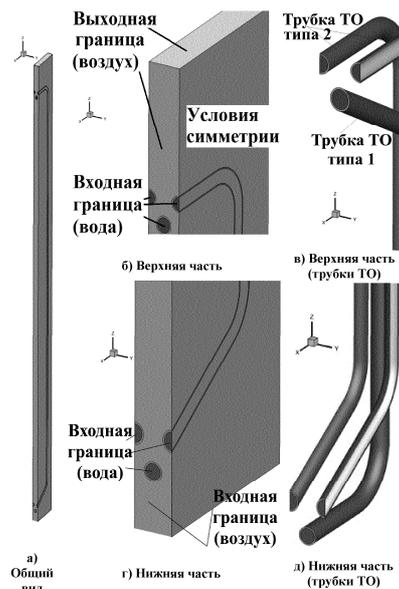
4. Способ по п.1, характеризующийся тем, что проводят обработку данных с помощью 3D-моделирования.



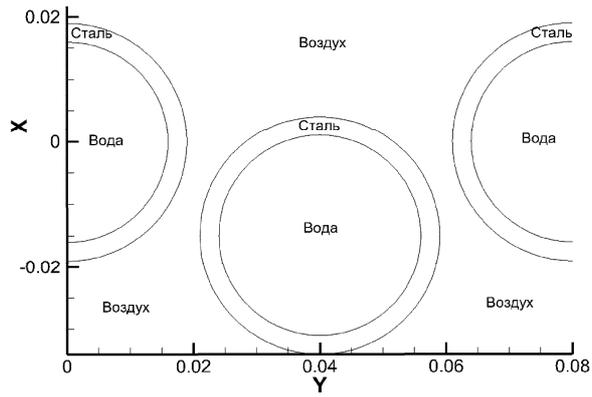
Фиг. 1



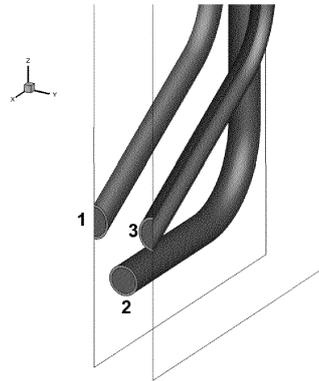
Фиг. 2



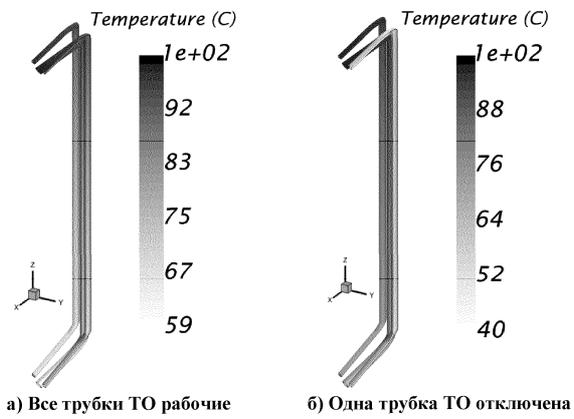
Фиг. 3



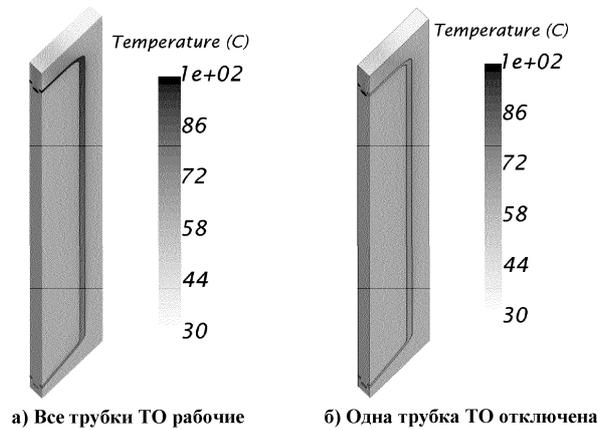
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

