

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-538-552

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF NATURAL CIRCULATION OF COOLING MEDIA IN SHIPBOARD REACTOR INSTALLATIONS

V. I. Korolev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

In projects of floating facilities with a nuclear power plant, great importance is attached to the formation of a set of properties of the internal self-protection of the reactor, i. e. the development of properties that ensure its safety based on natural feedbacks, processes and characteristics. To do this, the RU project is based on physical patterns and technical solutions that prevent or minimize possible consequences from emergency situations. In particular, the natural circulation of the coolant in case of loss of power supply by the circulation pumps of the first round allows cooling the core after its transfer to a subcritical state. However, in order for a natural circulation to occur sufficient to ensure nuclear and radiation safety, certain conditions must be met in a particular case. The paper notes that the most important property of reactor installations of nuclear vessels is their ability to ensure natural circulation of the coolant in emergency situations, as well as when operating at capacity. This makes it possible to reduce the dependence of reactor plant safety on the technical condition of power supplies. Currently, natural circulation of auxiliary cooling media in passive safety systems is also widely used in reactor installations. These include emergency reactor cooling systems using an emergency cooling system, including using intermediate heat exchangers; reducing emergency pressure in the protective shell in case of an accident with a large coolant leak; cooling the reactor vessel in an out-of-design accident with the formation of corium. The paper proposes a method for preliminary analysis of the reactor plant's ability to ensure natural circulation of the coolant, which allows us to compare various design solutions that contribute to an increase in coolant consumption during natural circulation. It is shown that for the operation of the reactor plant in stand-down mode and at energy power levels with natural circulation of the coolant, it is advisable to switch to boiling reactors. Passive safety systems using natural circulation have received special development on new nuclear vessels of projects 20870, 22220, 10510. Further development of safety systems using natural circulation to move cooling media is predicted.

Keywords: natural circulation, specific gravity, density difference, driving pressure, permissible flow rate, hydraulic resistance, circulation circuit, passive system, aggregate state, intermediate heat exchanger.

For citation:

Korolev, Vladimir I. "Analysis of the application of natural circulation of cooling media in shipboard reactor installations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.4 (2024): 538–552. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-538-552.

УДК 629.12–8:621.039

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ОХЛАЖДАЮЩИХ СРЕД В СУДОВЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

В. И. Королёв

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе проанализированы проектные решения по использованию естественной циркуляции для расхолаживания активных зон плавучих объектов с ядерной энергетической установкой при различных начальных условиях. Отмечается, что важнейшим свойством реакторных установок атомных судов

является заложенные в проект возможности по обеспечению естественной циркуляции теплоносителя в аварийных ситуациях, а также при работе на мощности. Это позволяет снизить зависимость безопасности реакторных установок от технического состояния источников электропитания. В настоящее время в реакторных установках также широко используется естественная циркуляция вспомогательных охлаждающих сред в пассивных системах безопасности. К ним относятся системы аварийного охлаждения реактора при помощи цистерны аварийного расхолаживания в том числе с использованием промежуточных теплообменников, снижения аварийного давления в защитной оболочке при аварии с большой течью теплоносителя, охлаждения корпуса реактора в запроектной аварии с образованием кориума. Предложен метод предварительного анализа возможности реакторной установки по обеспечению естественной циркуляции теплоносителя, позволяющий сопоставлять различные конструктивные решения, способствующие увеличению расхода теплоносителя при естественной циркуляции. Показано, что для работы реакторной установки в стояночном режиме и на энергетических уровнях мощности при естественной циркуляции теплоносителя целесообразным является переход к кипящим реакторам. Широкое применение получили пассивные системы безопасности с использованием естественной циркуляции на новых атомных судах пр. 20870, 22220, 10510. Прогнозируется дальнейшее развитие систем безопасности, использующих естественную циркуляцию для перемещения охлаждающих сред.

Ключевые слова: естественная циркуляция, удельный вес, разность плотностей, движущий напор, допустимый расход, гидравлическое сопротивление, циркуляционный контур, пассивная система, агрегатное состояние, промежуточный теплообменник.

Для цитирования:

Королёв В. И. Анализ применения естественной циркуляции охлаждающих сред в судовых реакторных установках / В. И. Королёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 4. — С. 538–552. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-538-552.

Введение (Introduction)

Формированию необходимых и достаточных условий для организации естественной циркуляции (ЕЦ) теплоносителя и вспомогательных охлаждающих сред на плавучих объектах с ядерной энергетической установкой в нормативных документах Ростехнадзора и Российского морского регистра судоходства придается большое значение. При этом по мере совершенствования реакторных установок «ОКБМ Африкантов» проявляет максимальную заинтересованность в увеличении уровня ЕЦ теплоносителя и вспомогательных охлаждающих сред. Это наилучшим образом проявляется в проектах моноблочных реакторных установок «РИТМ-200» [1] и «РИТМ-400». Ставятся также задачи безопасного развития атомных энергетических технологий в Арктике [2] и совершенствования систем аварийного охлаждения реакторных установок плавучих объектов [3].

Естественная циркуляция возникает за счет разницы в весе *опускного* и *подъемного* столбов жидкости (сред). В свою очередь, разность в весе связана с зависимостью плотности (удельного веса) воды от температуры. ЕЦ реализуется, если на определенном участке замкнутого контура подводится тепловая энергия q_1 , а на другом участке тепловая энергия q_2 отводится. В статике $q_1 = q_2$. При этом участок теплоотвода должен располагаться как можно выше участка теплоподвода.

Естественная циркуляция может рассматриваться в следующих случаях работы РУ: обеспечение стояночного режима ледокола, работа на мощности при отключенных ЦНПК, работа в аварийных режимах при потере электропитания ЦНПК, охлаждение вспомогательных сред в пассивных системах безопасности. Основной задачей, решаемой при использовании ЕЦ теплоносителя, является обеспечение максимально возможного расхода теплоносителя через активную зону без снижения ее надежности. Можно считать, что допустимыми с точки зрения надежности активной зоны являются номинальные параметры теплоносителя.

Мощность, которая отводится теплоносителем от активной зоны при ЕЦ в циркуляционном контуре, определяется из выражения

$$Q_{\text{ЕЦ}} \approx G_{\text{ЕЦ}} \bar{c}_p (t_2 - t_1), \quad (1)$$

где $G_{\text{ЕЦ}}$ — расход теплоносителя, обеспечиваемый при ЕЦ в контуре охлаждения;
 \bar{c}_p — средняя теплоемкость теплоносителя;

t_1, t_2 — температуры теплоносителя, соответственно, на входе в активную зону и на выходе из нее.

При оценке допустимого расхода теплоносителя можно принять максимальную температуру оболочек ТВЭЛ от мощности остаточного энерговыделения, при котором наступает режим объемного кипения теплоносителя. В крайнем случае необходимый расход теплоносителя можно принять по величине допустимого снижения запаса до кризиса теплообмена в активной зоне в зависимости от мощности остаточного энерговыделения.

В общем случае движущий напор определяется по формуле

$$P_{дв} = - \oint_{ABCD} \gamma(h) dh \quad (2)$$

где $\oint_{ABCD} \gamma dh$ — круговой интеграл по контуру ЕЦ;

$\gamma(h)$ — удельный вес среды на участках циркуляции.

Замкнутый контур ЕЦ можно разбить на N характерных участков. Для каждого i -го участка разбиения определяется средняя плотность (удельный объем) циркулирующей среды. При этом выделяются подъемный и опускной участки разбиения, которые различаются знаком. Считается, что опускной участок имеет положительный знак (более тяжелый) и подъемный участок — отрицательный знак (более легкий). При этом количество опускных участков равно N_o и количество подъемных — N_n . С учетом ранее изложенного выражение (2) можно привести к виду

$$P_{дв} \approx g \sum_i^N \bar{\rho}_i \Delta h_i = g \left(\sum_i^{N_o} \bar{\rho}_{io}(t, p, \varphi) \Delta h_{io} - \sum_i^{N_n} \bar{\rho}_{in}(t, p, \varphi) \Delta h_{in} \right), \quad (3)$$

где $\bar{\rho}_{io}(t, p, \varphi), \bar{\rho}_{in}(t, p, \varphi)$ — средние плотности циркулирующей среды в зависимости от температуры, давления и истинного объемного паросодержания, соответственно на опускном и подъемном участках контура ЕЦ;

$\Delta h_{io}, \Delta h_{in}$ — протяженности, соответственно, опускных и подъемных участков контура ЕЦ.

Принимая во внимание, что в статике $P_{дв} = \Delta p_k(G_{ЕЦ})$, расход теплоносителя в контуре ЕЦ можно оценить из выражения

$$G_{ЕЦ} = \left(\frac{P_{дв}}{k} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (4)$$

где k — коэффициент пропорциональности;

n — показатель степени.

Движущий напор, развиваемый в контуре ЕЦ, пропорционален площади фигуры, образующей замкнутый цикл $ABCD$ в координатах h, γ или h, t . При этом движущий напор должен преодолеть гидравлическое сопротивление контура циркуляции и обеспечить расход теплоносителя $G_{ЕЦ}$.

При ЕЦ в реакторе на выходе из активной зоны возможны различные термодинамические состояния теплоносителя. Он может быть недогрет до температуры насыщения, находится на линии насыщения ($\varphi = 0$), кипеть в активной зоне ($0 < \varphi \leq 1$). На рис. 1, а показаны варианты возможных циклов ЕЦ теплоносителя в РУ. Цикл $ABCD$ (1) образуется при недогреве теплоносителя до температуры насыщения. Возникающий при этом напор ЕЦ пропорционален площади фигуры $ABCD$ и его зависимость от расхода приведена на рис. 1, б (кривая 1). Предельный цикл $AB'CD$ возникает, когда теплоноситель в активной зоне нагревается до температуры насыщения. При этом плотность (удельный вес) теплоносителя на выходе из активной зоны равен плотности воды на линии насыщения: $\rho_{вых} = \rho'(p_1)$, а истинное объемное паросодержание при этом $\varphi = 0$.

Удельный вес теплоносителя при разогреве в реакторе и затем охлаждении в парогенераторе в общем случае изменяется в соответствии с зависимостью $\gamma(t, p, \varphi) = g\rho(t, p, \varphi)$ и на протяженности цикла перепад удельных весов составит $\Delta\gamma_1$. Циклу $AB'CD$ (2) соответствует зависимость

напора ЕЦ от расхода — кривая 2 на рис. 1, б. Если при этом гидравлическая характеристика циркуляционной петли определяется кривой 2' (см. рис. 1, б), то через контур естественной циркуляции возникает расход теплоносителя $G_{ЕЦ,1}$.

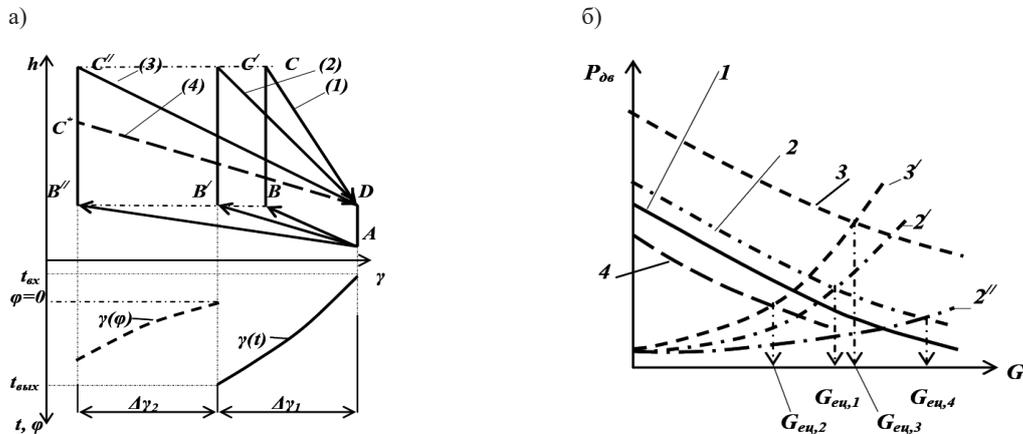


Рис. 1. Варианты конфигурации возможных циклов, обеспечивающих ЕЦ теплоносителя в судовом реакторе (а); гидравлическая схема определения расхода теплоносителя при различных вариантах образования напора ЕЦ и гидравлического сопротивления сети (б)

Для увеличения расхода естественной циркуляции в РУ можно образовать контур, например, минуя ЦНПК (обвод через байпасный канал с обратным клапаном) или сократить длину трассы, или уменьшить местные гидравлические сопротивления. В этом случае гидравлическая характеристика контура будет описываться кривой 2'' и расход возрастет до $G_{ЕЦ,4}$ — см. рис. 1, б.

При малом расходе теплоносителя через активную зону и высоких значениях энерговыделения в активной зоне возможно парообразование и на ее выходе $\varphi > 0$. В этом случае может возникнуть цикл $AB''C''D$ (3), который по площади больше цикла $AB'C'D$ ($S_{AB''C''D} > S_{AB'C'D}$). Поскольку $P_{ЕЦ} \sim S_{AB''C''D}$, то и напор естественной циркуляции будет определяться кривой 3 (см. рис. 1, б). Увеличение напора обусловлено дополнительной площадью цикла, образуемой за счет уменьшения удельного объема (удельного веса) теплоносителя в активной зоне из-за парообразования, описываемого кривой $\gamma(\varphi)$. При этом перепад удельных весов по циклу ЕЦ составит $\Delta\gamma_1 + \Delta\gamma_2$. За счет частичного испарения теплоносителя в активной зоне расход теплоносителя через нее может увеличиться до $G_{ЕЦ,3}$. Однако увеличение удельного объема теплоносителя, проходящего через ТВС, приведет к росту гидравлического сопротивления сети, поэтому реальный расход теплоносителя при ЕЦ может быть меньше, чем $G_{ЕЦ,3}$ (см. рис. 1, б).

Если температура среды (воды), подаваемой в парогенераторы, мало отличается от температуры охлаждаемого в нем теплоносителя, то возможно возникновение балластного участка (условно необогреваемого) в верхней части парогенератора и ЕЦ будет обуславливать цикл $AB''C''D$. Это приведет к уменьшению возможного напора ЕЦ, зависимость которого от расхода теплоносителя описывается кривой 4 (см. рис. 1, б). Расход ЕЦ при этом снизится до $G_{ЕЦ,2}$. При параметрах первого контура судовой РУ перепад плотностей теплоносителя на входе и выходе активной зоны за счет разогрева до температуры насыщения составляет 80–85 кг/м³, а при дальнейшем испарении воды вплоть до получения насыщенного пара — соответственно 550–570 кг/м³. Плотность теплоносителя почти линейно зависит от истинного объемного паросодержания и может быть определена по формулам:

$$\bar{\rho}_\varphi = \rho''\varphi + \rho'(1 - \varphi); \quad (5)$$

$$\varphi = c\beta; \quad \beta = \frac{1}{1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho''}{\rho'}}; \quad x = \frac{h_i - h'}{r}, \quad (6)$$

где ρ'' , ρ' — плотность, соответственно, насыщенного пара и воды на линии насыщения, кг/м³;
 φ — истинное объемное паросодержание;
 c — коэффициент пропорциональности;
 β — объемное паросодержание;
 h_i — энтальпия теплоносителя на i -м участке, кДж/кг;
 x — относительная энтальпия.

На рис. 2 показана зависимость плотности теплоносителя от температуры (однофазный теплоноситель) и истинного объемного паросодержания.

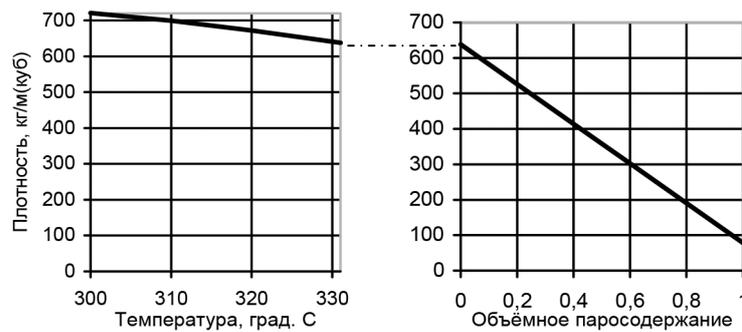


Рис. 2. Зависимость плотности теплоносителя от температуры и истинного объемного паросодержания ($p_j = 13$ МПа)

При работе реактора на мощности (нормальный режим) для увеличения в циркуляционном контуре (ЦК) уровня ЕЦ следует увеличивать перепады высот между поверхностями теплоподвода и теплоотвода и перепады плотностей сред на подъемном и опускном участках ЦК ЕЦ. В водородных реакторах разность плотностей обычно невысока и зависит от температур теплоносителя на входе и выходе активной зоны и среднего давления в контуре. Значительно большую разность плотностей можно достичь при наличии двухфазного потока в ЦК ЕЦ. Однако в этом случае реактор концептуально становится кипящим и требуются дополнительные решения по обеспечению ядерной безопасности. Разработана перспективная РУ АБВ-6Э тепловой мощностью 40 МВт с реактором интегрального типа и ЕЦ теплоносителя для двухреакторной и однореакторной ПЭБ [4]–[6].

Проблема создания малогабаритных ЯЭУ для перспективных объектов морской техники (например, подводных добычных комплексов) приводит к необходимости перехода от эволюционного развития традиционных установок с водо-водяными реакторами к поиску качественно новых решений. В работе [4] для глубоководных добычных комплексов предложена одноконтурная ЯЭУ с активной зоной на базе кольцевого твэла в виде двойной трубки Фильда. Конструкция представляет собой трехходовой тепловыделяющий канал (ТВК) с кольцевым твэлом и центральной не тепловыделяющей трубкой [4], [7]. В ТВК предусмотрена закрутка потока теплоносителя в кольцевой щели между нетепловыделяющей трубкой и внутренней поверхностью твэла.

Создаваемые закруткой потока центробежные силы приводят к сепарации жидкой фазы на внутренней поверхности твэла, что обеспечивает высокие тепловые потоки в докризисном режиме теплоотдачи при больших паросодержаниях. Для осуществления ЕЦ теплоносителя (рабочего тела) необходимо создать такие условия, при которых циркуляция будет обеспечиваться за счет разности гидростатических напоров опускного и подъемного столбов жидкости в замкнутом контуре. Такой тип циркуляции наиболее успешно может быть реализован в пароводяных контурах, когда имеет место наибольшая разность плотностей [8]–[10].

В пассивных системах безопасности для охлаждения теплоносителя применяются промежуточные среды с изменением фазового состояния. Для отвода остаточной теплоты активной зоны на действующих атомных ледоколах используется двухступенчатый принцип, а на пр. 20870, 22220 и 10510, соответственно, четырехступенчатый принцип (рис. 3, б). Во всех случаях реализуется механизм ЕЦ основных и промежуточных сред. Двухступенчатый принцип предполагает по-

дачу в парогенераторы промежуточной охлаждающей среды, находящейся в цистерне аварийного расхолаживания (ЦАР), при которой обеспечивается ЕЦ теплоносителя с передачей остаточной теплоты активной зоны данной среде. В результате охлаждающая среда испаряется, удаляясь в атмосферу передавая ей остаточную теплоту энерговыделения активной зоны.

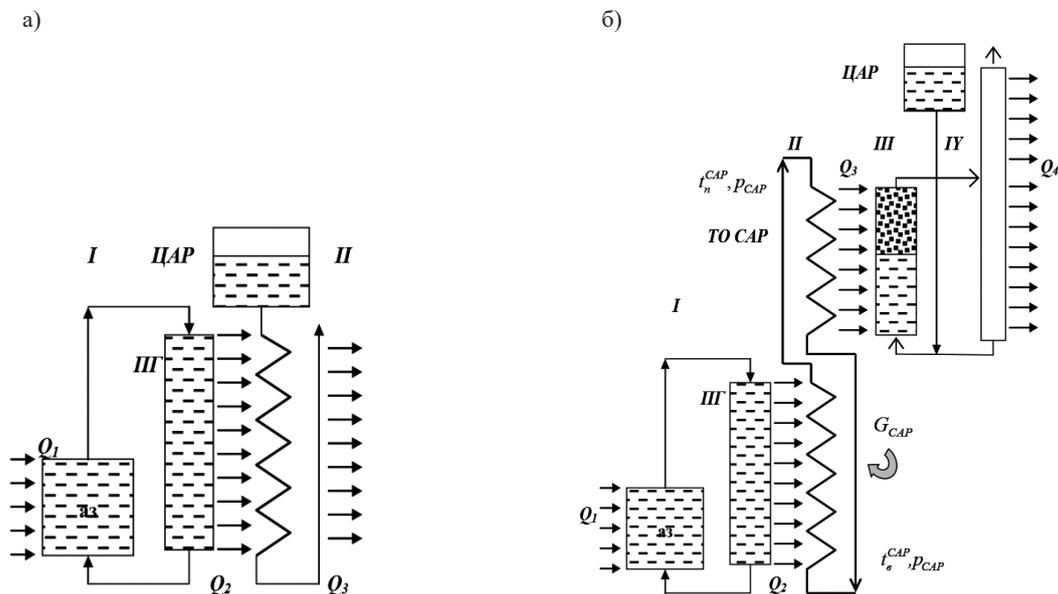


Рис. 3. Схемы отвода теплоты от активной зоны при полном обесточивании ЯЭУ:
 а — пр. 10521, 10580, 10081; б — пр. 20870, 22220, 10510

В новых проектах ледоколов для отвода остаточного энерговыделения активной зоны используется промежуточный теплообменник, в котором по замкнутому контуру циркулирует промежуточная охлаждающая среда. Данная среда частично испаряется в парогенераторах (подъемный участок) и затем конденсируется в промежуточном теплообменнике (опускной участок). В результате образуется вторая ступень отвода остаточной теплоты (второй контур ЕЦ). Для охлаждения среды в промежуточном теплообменнике используется ЦАР и запасенная в ней холодная вода, которая поступает в промежуточный теплообменник под действием гидростатического напора (опускной участок) и там испаряется, отводя остаточную теплоту активной зоны (подъемный участок). В результате образуется третья ступень отвода теплоты (третий контур ЕЦ). Пароводяная смесь, образовавшаяся в промежуточном теплообменнике, поступает в паровую трубу, конструктивно находящуюся в ЦАР (подъемный участок) и через нее удаляется в атмосферу, где охлаждается (разомкнутый опускной участок) образуется четвертая ступень отвода остаточной теплоты активной зоны.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Оценка движущего напора в контуре ЕЦ осуществляется по формуле (3). При этом расход в контуре ЕЦ определяется при совместном решении уравнений зависимости движущего напора ЕЦ от расхода среды $P_{дв}(G_{ЕЦ})$ и гидравлического сопротивления контура от расхода среды $\Delta p_k(G_{ЕЦ})$. Движущий напор ЕЦ в общем случае определяется по формуле (2). При этом перепад температур в активной зоне при заданной мощности будет уменьшаться при увеличении расхода среды (теплоносителя) через активную зону реактора. Зависимость движущего напора ЕЦ от расхода теплоносителя будет напоминать характеристику центробежного насоса (рис. 1, б). При увеличении отводимой от активной зоны мощности и сохранении расхода среды через активную зону перепад температур в активной зоне будет возрастать (формула (1)). Рост температуры теплоносителя в реакторах типа ВВРД может привести к закипанию теплоносителя и его частичному испарению, что изменит нейтронно-физические характеристики активной зоны. Одновременно будет возрастать перепад

удельных весов среды на опускном и подъемных участках ЦК. Это приведет к увеличению движущего напора ЕЦ в замкнутом контуре.

Предлагается графоаналитический метод оценки ЕЦ в замкнутых контурах судовых РУ с реактором типа ВВРД. Метод основан на сопоставлении i -й РУ с базовой. Считается, что для блочной РУ (например, КЛТ-40М) расход теплоносителя, развиваемый при ЕЦ, известен из экспериментальных данных. Будем считать данную РУ базовой при сопоставлении с другими РУ. Тогда задачу оценки относительного расхода теплоносителя через любую другую (вариант) i -ю РУ можно свести к сопоставлению ее с базовой РУ.

Величина движущего напора ЕЦ в статике равна суммарному гидравлическому сопротивлению замкнутого циркуляционного контура и поэтому для базовой и сопоставляемой с ней i -й РУ справедливы соотношения:

$$P_{дв,б} = \Delta p_{k,б}^{\Sigma}; \quad (7)$$

$$P_{дв,i} = \Delta p_{k,i}^{\Sigma}. \quad (8)$$

Здесь контур циркуляции теплоносителя разбит на j характерных участков, включающих входную часть реактора, тепловыделяющие сборки (ТВС), выходную часть реактора, парогенератор, выход из парогенератора, вход в гидрокамеры ЦНПК. При этом суммарное гидравлическое сопротивление замкнутого контура базовой РУ можно представить в виде

$$\Delta p_{k,б}^{\Sigma} = \sum_j^6 k_{j,б} (G_k)^{n_j} \approx k_{k,б}^{\Sigma} (G_k)^n. \quad (9)$$

По аналогии суммарное гидравлическое сопротивление замкнутого контура i -й РУ представим в виде

$$\Delta p_{k,i}^{\Sigma} = \sum_j^6 k_{j,i} (G_k)^{n_j} \approx k_{k,i}^{\Sigma} (G_k)^n \quad (10)$$

где $n_j = 1, 7 \dots 2$;

$$k_{j,б} = (1,1 \dots 1,54) 10^{-6};$$

$k_{k,б}^{\Sigma}, k_{k,i}^{\Sigma}$ — приведенные гидравлический коэффициент замкнутых контуров циркуляции базовой и i -й РУ соответственно.

Принимая во внимание, что допустимая отводимая мощность при ЕЦ для базовой РУ известна из практики, оценим требуемый для этого расход теплоносителя через реактор:

$$G_{ЕЦ_б} = \frac{Q_{ЕЦ_б}}{c_{pl} (t_{2б} - t_{1б})}. \quad (11)$$

Движущий напор ЕЦ в базовой РУ должен преодолеть гидравлическое сопротивление контура циркуляции. Тогда справедливо выражение

$$P_{дв_б} = \Delta p_{k_б} = k_{k_б}^{\Sigma} \left[\frac{Q_{ЕЦ_б}}{c_{pl} (t_{2б} - t_{1б})} \right]^n. \quad (12)$$

Допустим движущий напор ЕЦ в i -й РУ будет увеличен в k_{P_i} раз. Тогда

$$P_{дв_i} = \Delta p_{k_i} = k_{P_i} k_{k_б}^{\Sigma} \left[\frac{Q_{ЕЦ_б}}{c_{pl} (t_{2б} - t_{1б})} \right]^n. \quad (13)$$

где $k_{P_i} = P_{дв_i} / P_{дв_б}$ — коэффициент движущего напора ЕЦ в i -й РУ.

В результате развиваемый в i -й РУ расход ЕЦ составит

$$G_{ЕЦ_i} = \left(\frac{\Delta p_{k,i}}{k_{k,i}^{\Sigma}} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{Q_{ЕЦ_б}}{c_{pl} (t_{2,б} - t_{1,б})} \left(\frac{k_{P_i} \Delta k_{k,б}^{\Sigma}}{k_{k,i}^{\Sigma}} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (14)$$

Наибольшая отводимая от активной зоны мощность в i -й РУ составит

$$Q_{\text{ЕЦ},i} = Q_{\text{ЕЦ},6} \frac{(t_{2,i} - t_{1,i})}{(t_{2,6} - t_{1,6})} \left(\frac{k_{p,i} k_{k,6}^{\Sigma}}{k_{k,i}^{\Sigma}} \right)^{\frac{1}{n}} = Q_{\text{ЕЦ},6} k_{\Delta t,i} (k_{p,i} k_{\Delta p,i})^{\frac{1}{n}}, \quad (15)$$

где $k_{\Delta t,i} = \frac{(t_{2,i} - t_{1,i})}{(t_{2,6} - t_{1,6})}$ — коэффициент относительного перепада температур на активной зоне i -й РУ

при ЕЦ;

$$k_{\Delta p,i} = \frac{\Delta k_{k,6}^{\Sigma}}{k_{k,i}^{\Sigma}} \text{ — коэффициент относительных гидравлических потерь в } i\text{-й РУ.}$$

При назначении коэффициента перепада температур на активной зоне ($k_{\Delta t,i}$) для предполагаемых условий эксплуатации необходимо учитывать соблюдение теплотехнической надежности активной зоны, т. е. максимально допустимые температуры оболочек твэл и топливной композиции. В стационарных и переходных режимах нормальной эксплуатации температура ядерного топлива должна быть ниже температуры плавления топливной матрицы с учетом отклонений параметров от номинальных значений и влияния выгорания топлива. По данным, полученным после реакторных исследований твэлов с интерметаллидным топливом, значение допустимой температуры облученного топлива составляет 550 °С, температура оболочки твэла должна быть не более 350–360 °С. Температура оболочки твэла на действующих РУ может иметь максимальное значение в области поверхностного кипения и составляет до 348 °С. При этом максимальное значение температуры топливной композиции с учетом отклонений параметров от номинальных значений составляет примерно 380 °С. С использованием выражений (8)–(14) на рис. 4 построены зависимости отводимой от активной зоны мощности при различных значениях коэффициентов движущего напора, гидравлических потерь и перепадов температуры на активной зоне для i -й РУ.

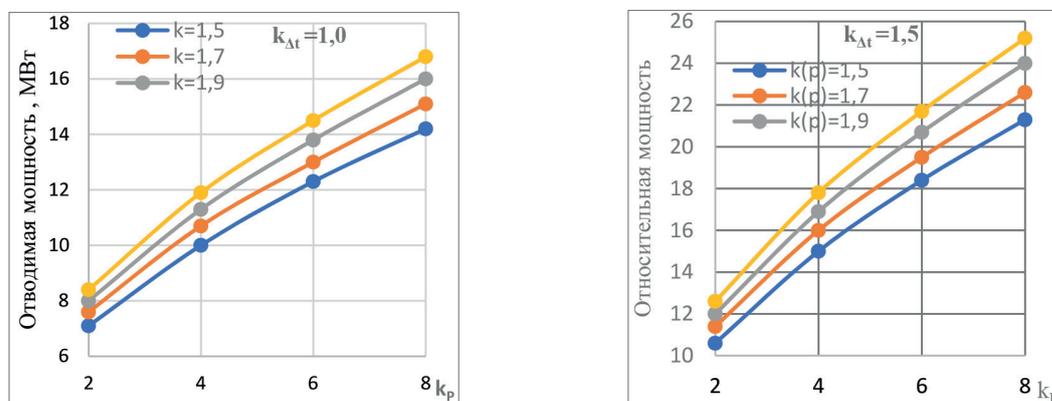


Рис. 4. Зависимости отводимой от активной зоны мощности при различных значениях коэффициентов движущего напора, гидравлических потерь и перепадов температуры на активной зоне для судовых РУ с реактором типа ВВРД

В новых пр. 20870, 22220, 10510 судовых РУ широко используется ЕЦ в пассивных системах для аварийного охлаждения активной зоны. Данные системы развиваются с учетом повышения их надежности и длительности функционирования. Для этого увеличивается количество ступеней ЕЦ, используются промежуточные среды с изменением фазовых состояний, а также увеличивается запас охлаждающей воды в автономных емкостях. При оценке эффективности ЕЦ в таких системах следует несколько изменить ранее рассмотренный алгоритм.

Расход теплоносителя через реактор оценивается по формуле

$$G_{\text{ЕЦ},6} = \frac{Q_{\text{ЕЦ},6}}{(h_{2,6} - h_{1,6})}, \quad (16)$$

где $h_{2,6}, h_{1,6}$ — энтальпия охлаждающей среды, соответственно, на выходе и входе для базового промежуточного теплообменника;

$Q_{\text{ЕЦ},6}$ — тепловая мощность, отводимая в базовом теплообменнике.

Отводимая от активной зоны (промежуточного теплообменника) относительная мощность в i -й РУ составит:

$$\frac{Q_{\text{ЕЦ},i}}{Q_{\text{ЕЦ},6}} = \frac{(h_{2,i} - h_{1,i})}{(h_{2,6} - h_{1,6})} \left(\frac{k_{p,i} k_{k,6}^{\Sigma}}{k_{k,i}^{\Sigma}} \right)^{\frac{1}{n}} = k_{\Delta h,i} (k_{p,i} k_{\Delta p,i})^{\frac{1}{n}}, \quad (17)$$

где $k_{\Delta h,i} = \frac{(h_{2,i} - h_{1,i})}{(h_{2,6} - h_{1,6})}$ — коэффициент перепада энтальпий на промежуточном теплообменнике i -й РУ при ЕЦ.

В РУ, где охлаждающие среды изменяют свое агрегатное состояние следует рассматривать циклы ЕЦ в координатах h, p . Обычно расчеты таких систем являются громоздкими и осуществляются методом последовательных приближений. При этом предварительно задается расход среды во второй ступени замкнутого контура теплоотвода (см. рис. 3). Для данного расхода оцениваются распределение поверхностей теплообмена в парогенераторе на экономайзерном, испарительном и пароперегревательном участках и геометрические высоты данных участков. Затем для промежуточного теплообменника (ТО САР) оцениваются поверхности, занятые процессами конденсации и доохлаждения, а также геометрическое расположение этих участков. Для участков теплоподвода (подъемный) и теплоотвода (опускной) вначале оцениваются плотности сред и затем движущий напор ЕЦ в промежуточном контуре по формуле (3).

После вычисления движущего напора ЕЦ в контуре он сопоставляется с предварительно оцененным гидравлическим сопротивлением контура для заданного расхода ЕЦ. При достижении необходимой точности сопоставления считаются известными отводимая мощность остаточного энерговыделения активной зоны, давление в промежуточном контуре и температуры пара и воды в промежуточном теплообменнике. При решении задачи методом последовательных приближений можно использовать графическое построение цикла ЕЦ в координатах h, p .

Результаты (Results)

В соответствии с предложенной методикой рассмотрены графоаналитические модели ЕЦ теплоносителя при номинальном перепаде температур на активной зоне для проектов ледоколов с блочной и моноблочной РУ (рис. 5). В блочной РУ активная зона расположена несколько выше нижней кромки теплообменной поверхности парогенераторов, поэтому опускной участок теплоносителя, находящийся ниже нижней кромки активной зоны, частично компенсирует подъемную часть, находящуюся ниже активной зоны (рис. 5, а). Данное расположение активной зоны и парогенераторной поверхности снижает движущий напор ЕЦ. При этом большая часть поверхности парогенератора находится над активной зоной. Ввиду низкого расположения теплообменной поверхности парогенератора расстояние между центром теплоотвода и центром теплоподвода в активной зоне невелико, что обуславливает малый движущий напор ЕЦ в блочной РУ (см. рис. 5, а).

В моноблочной РУ существенное внимание уделено увеличению движущего напора теплоносителя в контуре ЕЦ. В первую очередь увеличены расстояния между центрами теплоподвода и теплоотвода за счет увеличения высоты корпуса, интегрированного и размещенного относительно коротких кассет, парогенерирующих в верхней части корпуса (см. рис. 5, б). Активная зона размещена в нижней части внутрикорпусной шахты и имеет высоту, соизмеримую с высотой кассет парогенерирующих. Данное расположение участков теплоподвода и теплоотвода способствует значительному увеличению движущего напора ЕЦ и соответствующей площади фигуры, образованной подъемным и опускным участками циркуляционного контура. При этом повышение дви-

жущего напора ЕЦ осуществляется только за счет увеличения геометрических высот, поскольку температура (плотность) теплоносителя на входе и выходе активных зон практически не изменяется по сравнению с блочной РУ. На рис. 6, а приведено сопоставление диаграмм контура циркуляции при ЕЦ с возможным увеличением перепада температур в активной зоне в РУ пр. 22220. Данное изменение позволит несколько увеличить движущий напор ЕЦ, однако это будет не столь существенно.

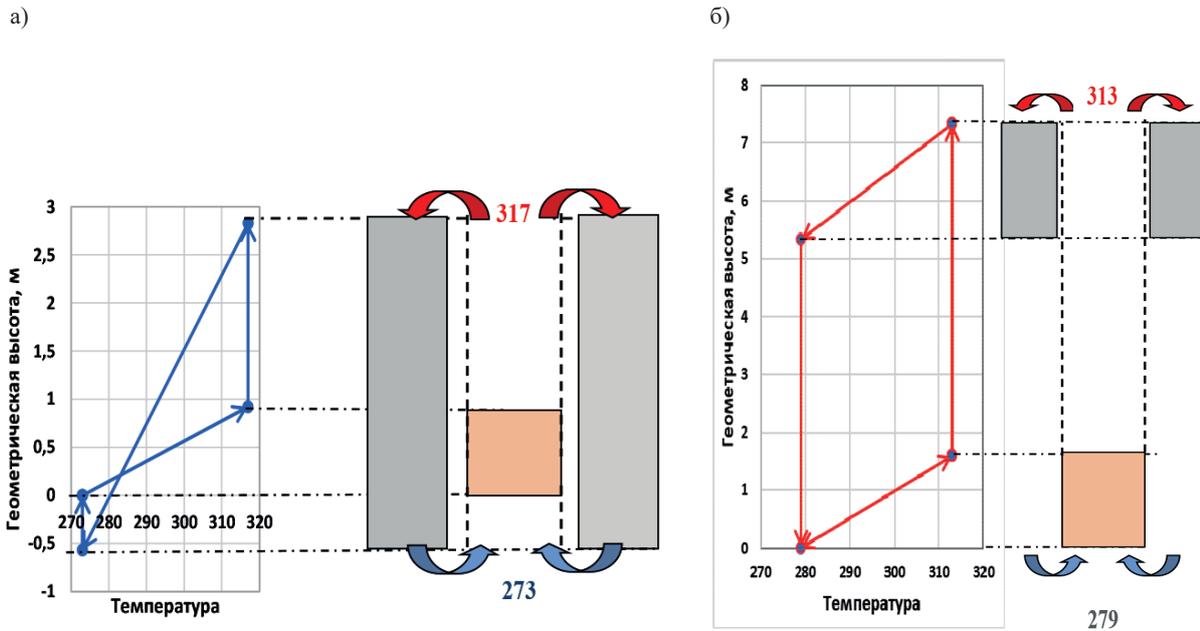


Рис. 5. Графоаналитические модели ЕЦ теплоносителя при номинальном перепаде температур в активной зоне РУ: а — пр. 10521; б — пр. 22220

Применение однофазного водяного теплоносителя в интегральных реакторах с ЕЦ теплоносителя для увеличения напора ЕЦ требует увеличения высоты контура циркуляции, что приводит к увеличению массогабаритных показателей реактора. Переход на пароконденсатный цикл (ПКЦ) в первом контуре, когда на выходе из активной зоны генерируется насыщенный пар, конденсируемый в парогенераторе, позволяет значительно снизить массогабаритные характеристики интегрального реактора и увеличить напор ЕЦ. На рис. 6, б показана графоаналитическая модель формирования движущего напора ЕЦ в перспективной интегральной РУ с ТВК в координатах h, ρ . Данная модель сравнивается с блочной судовой РУ с водным теплоносителем. В интегральной РУ с ПКЦ реализованы благоприятные условия для ЕЦ теплоносителя вследствие увеличения движущего напора, так как в подъемной части контура находится пар, который конденсируется (используется теплота фазового перехода), что существенно снижает необходимый расход теплоносителя через активную зону по сравнению с традиционными водоохлаждаемыми реакторами. Высокая эффективность теплоотдачи при конденсации теплоносителя позволяет существенно уменьшить площадь теплообменной поверхности и габариты ПГ. Выполненные конструктивные проработки показали, что размеры интегральных реакторов с ПКЦ и ЕЦ в первом контуре не превышают размеры интегральных водоохлаждаемых реакторов с принудительной циркуляцией теплоносителя, например, реакторов типа «РИТМ-200» мощностью 150–175 МВт и типа «Шельф» мощностью 28 МВт [4], [9].

В настоящее время в пассивных системах безопасности используются вторичные охлаждающие среды с изменением фазового состояния. Примером может служить система аварийного расхолаживания активной зоны при потере электропитания с использованием цистерны аварийного расхолаживания (ЦАР). При этом система прошла значительную модернизацию, начиная

с цистерны под давление воздуха (см. рис. 3, а), до многоступенчатой системы с использованием промежуточных вспомогательных сред, в которых в полной мере используется ЕЦ (см. рис. 3, б).

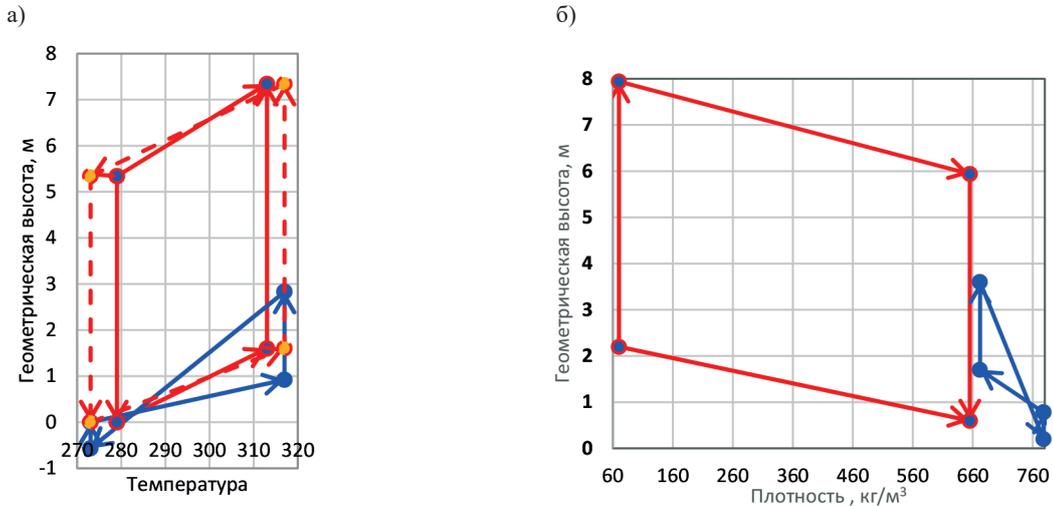


Рис. 6. Сопоставление диаграмм циркуляции теплоносителя при ЕЦ для проектов РУ при номинальных перепадах температур теплоносителя в активной зоне:
а — — — пр. 10521 и 22220; - - - — пр. 22220
(с увеличенным перепадом температур в активной зоне);
б — перспективная интегральная РУ с ТВК
(с изменением плотности теплоносителя до насыщенного пара)

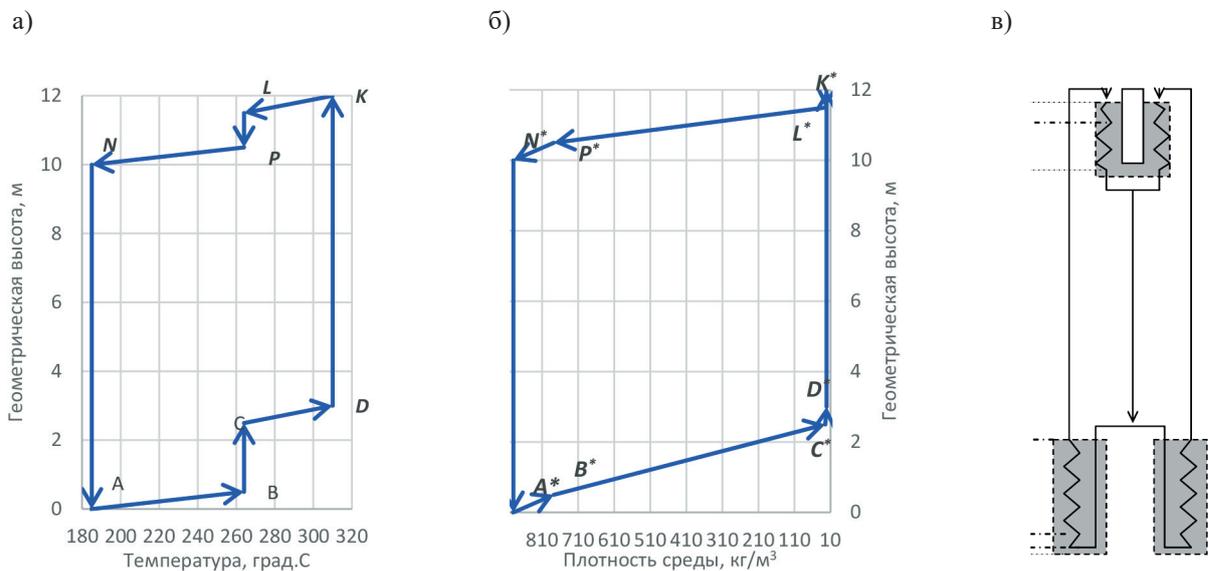


Рис. 7. Схема формирования замкнутого цикла ЕЦ вспомогательной охлаждающей среды в промежуточном теплообменнике (ТО САР) в теплогидравлической системе ПГ (ТО САР) с изменением фазового состояния циркулирующих сред в координатах $h-t$ (а) и $h-p$ (б):
подъемный участок: AB — экономайзерный участок ПГ; BC — испарительный участок ПГ;
 CD — пароперегревательный участок ПГ; DK — подвод пара к ТО САР;
опускной участок: KLP — охлаждение и конденсация пара в трубной системе ТО САР;
 PN — доохлаждение конденсата в трубной системе ТО САР;
 NA — подвод охлажденного конденсата на вход обогреваемого участка ПГ;
графическое представление гидравлической системы ТО САР (в)

На рис. 7, а показана схема формирования замкнутого цикла ЕЦ для среды промежуточного контура охлаждения теплоносителя с изменением фазового состояния в теплогидравли-

ческой системе ПГ-теплообменник системы аварийного расхолаживания (ТО САР) в координатах $h-t$. На участке AB осуществляется нагрев среды промежуточного контура до температуры насыщения при заданном давлении в контуре — экономайзерный участок ПГ. Затем реализуется испарительный участок ПГ, где температура среды остается неизменной — на схеме линия BC показана в виде отрезка. Далее среда промежуточного контура проходит пароперегревательный участок ПГ — отрезок CD и нагревается. Образовавшийся пар поступает по подводящим трубопроводам в верхнюю часть промежуточного теплообменника ТО САР. Данный подъемный участок на схеме показан в виде отрезка DK .

В промежуточном теплообменнике пар конденсируется до температуры насыщения — отрезок KL . Затем конденсат стекает в нижнюю часть трубной системы теплообменника, доохлаждается охлаждающей средой, поступающей из ЦАР (вторая ступень охлаждения — см. рис. 3, б). В результате температура среды промежуточного контура снижается. Данный процесс моделируется отрезком PN . Охлажденный конденсат поступает по водяным трубопроводам на вход обогреваемого участка ПГ — отрезок NA . Давление в промконтуре может установиться в пределах 5–9 МПа в зависимости от соотношения между объемами воды и пара в замкнутом контуре. Теплота, отводимая промежуточным теплообменником ТО САР, аккумулируется в объеме воды ЦАР, затем отводится в атмосферу с паром, получаемым от испарения воды ЦАР. Таким образом, организованный тепловой цикл $ABCDKLNA$ создает условия для ЕЦ среды промежуточного контура. Каждой точке фигуры $ABCDKLNA$ соответствуют определенная геометрическая высота h , температура и плотность среды.

На рис. 7, б показана схема замкнутого цикла ЕЦ для среды промежуточного контура охлаждения теплоносителя в теплогидравлической системе ПГ — промежуточный теплообменник в координатах h, ρ . Здесь каждая точка отображает плотность среды и перепад высот между точками замкнутого цикла. Аналогично рис. 6 смежные отрезки соответствуют последовательным процессам изменения состояния среды промежуточного контура.

Обсуждение (Discussion)

За счет изменения конструкции РУ и фазового состояния теплоохлаждающих сред можно добиться высоких значений движущих напоров ЕЦ в замкнутых охлаждающих контурах. Однако одновременно необходимо искать конструктивные решения, позволяющие существенно сократить гидравлическое сопротивление контура циркуляции. Если принять в первом приближении, что между гидравлическим сопротивлением контура и расходом среды существует квадратичная зависимость, то при существенном росте движущего напора ЕЦ расход среды в контуре будет увеличиваться значительно меньше, т. е. $G_{ЕЦ} \sim \sqrt{P_{дв}}$. При условии, если увеличить движущий напор ЕЦ в моноблочной РУ в 9 раз по сравнению с блочной РУ и не принимать меры по снижению гидравлических потерь в циркуляционной петле, то можно ожидать увеличение расхода теплоносителя в контуре всего в 3 раза.

Этого недостаточно для организации ЕЦ теплоносителя в режиме стоянки ледокола в ожидании проводки с отключенными ЦНПК. Проектант РУ атомных ледоколов принял меры по снижению гидравлического сопротивления циркуляционной петли применив клапанную коробку с уменьшением протяженности циркуляционной петли и обводе ЦНПК в режиме ЕЦ (при остановленном ЦНПК). В соответствии с оценками проектанта снижение гидравлического сопротивления (коэффициента гидравлических потерь) в моноблочной РУ составляет примерно $k_{\Delta p, i} = \frac{k_{1,6}}{k_{1,i}} \approx 2$.

При реализации относительно кратковременных режимов работы при ЕЦ теплоносителя можно увеличить перепад температур в активной зоне, не достигая объемного парообразования в первом контуре и не снижая теплотехнической надежности активной зоны. Данное допущение позволит несколько увеличить отводимую от реактора мощность. При этом следует отметить, что в рамках концепции реакторов типа ВВРД и ограниченности габаритов судовых РУ вряд ли возможно существенно увеличить ЕЦ в первом контуре.

Повышение уровня ЕЦ теплоносителя в перспективных судовых РУ можно обеспечить при переходе на кипящие реакторы. Предельным вариантом в этом случае является реактор с ПКЦ и ТВК. При этом необходима проработка вариантов конструкции циркуляционных трактов с минимизацией гидравлических потерь без ущерба для устойчивости циркуляции теплоносителя. В пассивных системах безопасности, предназначенных для аварийного расхолаживания реактора (отвода остаточного энерговыделения от активной зоны), снижения аварийного давления в защитной оболочке начиная с пр. 20870, 22220 и 10510 широко используются многоступенчатые системы с ЕЦ охлаждающих сред. При этом следует отметить, что начиная с а/л «Ямал» (пр. 10521), появляется штатная пассивная одноступенчатая система расхолаживания реактора при полном обеспечении ЯЭУ с использованием контура ЕЦ теплоносителя при вводе в действие ЦАР. Система включалась автоматически при снижении давления пара за парогенераторами $p_{\text{пр}} \leq 0,3$ МПа, и охлаждающая вода поступала из двух ЦАР, емкостью по 1,25 м³ каждая, в парогенераторы, а образующийся пар сбрасывался из главного паропровода в атмосферу. Длительность работы этой системы была рассчитана не более чем на 30 мин. Впоследствии данная система была внедрена на всех действовавших ледоколах.

Конструктивное построение пассивных систем безопасности с точки зрения применения ЕЦ охлаждающих сред ограничено в меньшей мере, чем организация ЕЦ теплоносителя. Здесь широко используются различные фазовые состояния воды и относительная неограниченность габаритных размеров. В этой связи пассивные системы безопасности будут и в дальнейшем развиваться в первую очередь для отвода остаточного энерговыделения от активной зоны при расхолаживании и разгерметизации первого контура. Механизмы ЕЦ целесообразно также использовать при за-проектных авариях (например, охлаждение кессона реактора при образовании кориума в корпусе реактора).

Заключение (Conclusion)

Проведенный анализ возможности судовых реакторных установок к обеспечению ЕЦ теплоносителя и вторичных охлаждающих сред пассивных систем безопасности показал возможности и широкую применимость данного механизма в судовых РУ. При этом показаны ограничения возможности использования ЕЦ теплоносителя в судовых реакторах. В первую очередь это связано с концепцией ВВРД и габаритными ограничениями для судовых РУ. В этой связи имеет малую вероятность работа таких реакторов на энергетических уровнях мощности при отключенных ЦНПК. При этом возможно нормальное расхолаживание реактора при глушении реактора с любого уровня мощности. При использовании кипящих реакторов в судовых РУ можно значительно повысить уровень ЕЦ теплоносителя и отводить от активной зоны мощность до 20–25 МВт. При использовании пароконденсатного цикла в системе охлаждения активной зоны можно довести мощность реактора при ЕЦ до 120–140 МВт. При переходе на двухфазные охлаждающие среды в первом контуре потребуются дополнительные меры ядерной и радиационной безопасности реакторных установок.

Значительно меньше ограничений для организации ЕЦ охлаждающих сред существует при формировании пассивных систем безопасности. Планируется расширение применения ЕЦ в системах безопасности различного назначения для повышения ядерной безопасности реакторов и ядерных энергетических установок в целом. Определенную конкуренцию системам аварийного расхолаживания, основанным на ЕЦ, могут составить системы пассивного отвода теплоты со струйными средствами циркуляции, обеспечивающими расхолаживание реактора неограниченное время [11], [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королёв В. И. Анализ новых технических решений по реакторной установке «РИТМ-200» в пр. 22220 универсальных атомных ледоколов / В. И. Королёв // Вестник Государственного университета

морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 945–960. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-945-960.

2. Саркисов А. А. Безопасное развитие атомных энергетических технологий в Арктике: перспективы и подходы / А. А. Саркисов, С. В. Антипов, Д. О. Смоленцев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. — 2018. — № 3. — С. 5–17. DOI: 10.26583/npe.2018.3.01.

3. Пейч Н. Н. О возможности совершенствования систем аварийного охлаждения реакторных установок плавучих объектов / Н. Н. Пейч, Д. Н. Шаманов, А. В. Гравшин // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы Восьмой междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: СПб. гос. морской техн. ун-т, 2019. — С. 326–329.

4. Кудинович И. В. Интегральные водоохлаждаемые реакторы с пароконденсатным циклом и естественной циркуляцией теплоносителя для объектов морской техники Морские интеллектуальные технологии / № 4 том 3, 2020 / № 4 part 3, 2020, с. 146–151 DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.055.

5. Зверев Д. Л. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние / Д. Л. Зверев, Ю. П. Фадеев, А. Н. Пахомов [и др.] // Атомная энергия. — 2020. — Т. 129. — № 1. — С. 29–37.

6. Зверев Д. Л. Опыт создания и перспективы развития ядерных энергетических установок для ледокольного флота и энергообеспечения / Д. Л. Зверев, Ю. П. Фадеев, А. Н. Пахомов, В. И. Полуничев // Атомная энергия. — 2018. — Т. 125. — № 6. — С. 318–322.

7. Пат. 2307981 Российская Федерация, МПК F22B 1/00. Парогенерирующее устройство / М. Г. Хорьков, И. В. Кудинович, В. А. Воронцов; заяв. и патентообл. ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова». — № 2006100718/06; заявл. 10.01.2006; опубл. 10.10.2007, Бюл. 28.

8. Пат. 2732857 Российская Федерация, МПК G21C 15/00. Система пассивного отвода тепла реакторной установки / Н. Н. Пейч, Д. Н. Шаманов, Д. А. Алексеев; заяв. и патентообл. СПб. гос. морской техн. ун-т. — № 2019140364; заявл. 01.11.2018; опубл. 23.09.2020, Бюл. № 27.

9. Пат. 2740786 Российская Федерация, МПК G21C 15/18. Система пассивного отвода тепла реакторной установки / Н. Н. Пейч, Д. Н. Шаманов, Д. А. Алексеев; заяв. и патентообл. СПб. государственный морской технический университет. — № 2020113851; заявл. 03.04.2020; опубл. 21.01.2021, Бюл. № 3.

10. Пейч Н. Н. Исследование влияния высоты циркуляционного тракта на гидравлические характеристики систем пассивного отвода тепла морских атомных установок / Н. Н. Пейч, Д. Н. Шаманов, А. В. Гравшин // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4–1 (42). — С. 140–143.

11. Гравшин А. В. Разработка и исследование систем пассивного отвода теплоты со струйными средствами циркуляции для судовых реакторных установок: дис... канд. техн. наук / А. В. Гравшин; науч. рук. В. В. Кожемякин— СПб., 2024. — 23 с.

12. Аполлова А. В. Разработка системы пассивного отвода тепла со струйными средствами циркуляции: дис. ... канд. техн. наук / А. В. Аполлова; науч. рук. Н. Н. Пейч. — СПб., 2020. — 25 с.

REFERENCES

1. Korolev, Vladimir I. “Analysis of new technical solutions for the RITM-200 reactor plant in the project 22220 of universal nuclear icebreakers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 945–960. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-945-960.

2. Sarkisov, A. A., S. V. Antipov, D. O. Smolentsev, V. P. Bilashenko, M. N. Kobrinsky, V. A. Sotnikov, and P. A. Shvedov. “Safe development of nuclear power technologies in the arctic: prospects and approaches.” *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika* 3 (2018): 5–17. DOI: 10.26583/npe.2018.3.01.

3. Peich, N. N., D. N. Shamanov, and A. V. Gravshin. “On the possibility of improving the emergency cooling systems for reactor installations of floating objects.” *Aktual'nye problemy morskoi energetiki. Materialy Vos'moi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet, 2019. 326–329.

4. Kudinovich, Igor V., Adelina Zh. Suteeva, and Vitaly G. Khoroshev. “Nuclear power plants for advanced civil marine technology.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 4(386) (2018): 95–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106.

5. Zverev, D. L., Y. P. Fadeev, A. N. Pakhomov, V. Y. Galitskikh, V. I. Polunichev, K. B. Veshnyakov, S. V. Kabin, and A. Y. Turusov. “Reactor installations for nuclear icebreakers: origination experience and current status.” *Atomic Energy* 129.1 (2020): 18–26. DOI: 10.1007/s10512-021-00706-x.

6. Zverev, D. L., Y. P. Fadeev, A. N. Pakhomov, and V. I. Polunichev. “Nuclear power plants for the icebreaker fleet and power generation in the arctic region: development experience and future prospects.” *Atomic Energy* 125.6 (2019): 359–364. DOI: 10.1007/s10512-019-00494-5.

7. Khor’kov, M. G., I. V. Kudinovich, and V. A. Vorontsov. RU 2307 981 C1, IPC F22B 1/00. Parogeneriruyushchee ustroystvo. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Oct. 2007.

8. Peich, N. N., D. N. Shamanov, D. A. Alekseev, I. V. Shamanova, A. G. Andreev, A. N. Pakhomov, A. N. Sokolov, and A. M. Khizbullin. RU 2 732 857 C1, IPC G21C 15/00. Sistema passivnogo otvoda tepla reaktornoj ustanovki. Russian Federation, assignee. Publ. 23 Sept. 2020.

9. Peich, N. N., D. N. Shamanov, and D. A. Alekseev. RU 2 740 786 C1, IPC G21C 15/18. Sistema passivnogo otvoda tepla reaktornoj ustanovki. Russian Federation, assignee. Publ. 21 Jan. 2021.

10. Peich, N. N., D. N. Shamanov, and A. V. Gravshin. “Investigation of circulation loop height influence on hydraulic characteristics of passive heat removal system of marine nuclear power plants.” *Marine Intellectual Technologies* 4–1(42) (2018): 140–143.

11. Gravshin, A. V. Razrabotka i issledovanie sistem passivnogo otvoda teploty so struinymi sredstvami tsirkulyatsii dlya sudovykh reaktornykh ustanovok. Abstract of PhD diss. SPb, 2024.

12. Apollova, A. V. Razrabotka sistemy passivnogo otvoda tepla so struinymi sredstvami tsirkulyatsii. Abstract of PhD diss. SPb, 2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Королёв Владимир Ильич —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vlikor2007@yandex.ru, kaf_snef@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Korolev, Vladimir I. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: vlikor2007@yandex.ru, kaf_snef@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 20 мая 2024 г.
Received: May 20, 2024.*