

16. *Leshchuk O.G., Sazonova T.V., Shelagurova M.S.* Razrabotka i realizatsiya metodov videonavigatsii dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Development and implementation of video navigation methods for unmanned aerial vehicles], *Sb. trudov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki po napravleniyu «Intellektual'nye sistemy navedeniya vysokotochnogo oruzhiya». Ch. 3. Geoinformatsionnye platformy voennogo naznacheniya. Tekhnopolis «Era», Anapa., 2023* [Collection of proceedings of the scientific and technical conference "State and prospects for the development of modern science in the direction of "Intelligent guidance systems for high-precision weapons". Part 3. Geoinformation platforms for military purposes. Technopolis "Era", Anapa., 2023], pp. 4-13.
17. Tekhnicheskaya spetsifikatsiya lazernogo dal'nomera LRF03C01S [Technical specification of laser rangefinder LRF03C01S].
18. *Sazonova T.V., Shelagurova M.S., Korneva E.G.* Issledovanie rezhima ekstremal'noy korektsii po polyu rel'efa metodom matematicheskogo modelirovaniya s ispol'zovaniem rezul'tatov letnykh ispytaniy [Study of the regime of extreme correction along the relief field by the method of mathematical modeling using the results of flight tests], *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern technologies], No. 2021/05.
19. *Sazonova T.V., Shelagurova M.S.* Avtonomnaya vysokotochnaya navigatsiya letatel'nykh apparatov po mikrorel'efu s iskusstvennym i estestvennym ob'ektovyim sostavom [Autonomous high-precision navigation of aircraft over microrelief with artificial and natural object composition], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and systems. Management, control, diagnostics], 2024, No. 2, pp. 25-29.
20. *Sazonova T.V., Shelagurova M.S.* Avtonomnaya vysokotochnaya navigatsiya letatel'nykh apparatov po mikrorel'efu s iskusstvennym i estestvennym ob'ektovyim sostavom [Autonomous high-precision navigation of aircraft over microrelief with artificial and natural object composition], *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika* [Instruments and systems. Control. Control. Diagnostics], 2024, No. 2, pp. 25-29.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

**Сазонова Татьяна Владимировна** – Акционерное общество «Раменское Приборостроительное конструкторское бюро (АО «РПКБ»); e-mail: tsazonova@rpkb.ru; г. Раменское, Россия; тел.: 89166834878; действительный член Академии Навигации и Управления Движением; д.т.н.; главный конструктор.

**Шелагурова Марина Сергеевна** – e-mail: marinashell@mail.ru; тел.: 89166143940; действительный член Академии Навигации и Управления Движением по секции молодых ученых; к.т.н.; начальник лабораторного сектора.

**Sazonova Tatyana Vladimirovna** – Joint Stock Company "Ramenskoye Design Company (JSC RDC)"; e-mail: tsazonova@rpkb.ru; Ramenskoye, Russia; phone: +79166834878; full member of the Academy of Navigation and Traffic Control; dr. of eng. sc.; chief designer.

**Shelagurova Marina Sergeevna** – e-mail: marinashell@mail.ru; phone: +79166143940; full member of the Academy of Navigation and Traffic Control of a section of young scientists; cand. of eng. sc.; head of the laboratory sector.

УДК 621.5

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-230-242

**В.В. Дядичев, С.Г. Менюк, Д.С. Менюк**

### **РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ОТ БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ С ДВУХФАЗНЫМ КОЛЬЦЕВЫМ ТЕРМОСИФОНОМ**

Цель данного исследования заключается в создании компьютерной модели, которая будет использоваться для улучшения системы пассивного отвода тепла от бассейна выдержки с двухфазным кольцевым термосифоном. Данная модель позволит провести анализ работы системы, определить набор квазиоптимальных решений для ее параметров и улучшить эффективность отвода тепла. Разработка такой модели может помочь улучшить процессы теплообмена и повысить эффективность работы системы в целом. **Метод.** Для решения поставленной задачи ис-

пользовались методы математического и компьютерного моделирования, производилось изучение механизмов передачи тепла в системе и определение оптимальных параметров для эффективного отвода тепла, а также сравнение различных вариантов конструкции и параметров системы для выбора наиболее эффективного решения. Использование данных методов обеспечил комплексный подход к разработке и совершенствованию системы пассивного отвода тепла с двухфазным кольцевым термосифоном. **Результат.** Разработана компьютерная модель совершенствования системы пассивного отвода тепла от бассейна выдержки с двухфазным кольцевым термосифоном. Эта модель позволяет проводить анализ работы системы, усовершенствовать ее параметры и улучшить эффективность отвода тепла. Создание такой модели является важным шагом в развитии и совершенствовании системы, позволяя более точно прогнозировать ее работу и вносить необходимые улучшения. **Вывод.** Разработанная компьютерная модель может быть использована для дальнейших исследований, усовершенствования процессов отвода тепла и повышения эффективности работы системы в целом. Она позволяет более детально изучить процессы отвода тепла и настроить работу системы. Модель предоставляет возможность проводить численные расчеты, анализировать различные сценарии и оценивать эффективность изменений параметров системы.

*Компьютерная модель; система пассивного отвода тепла; система охлаждения топливного бассейна.*

V.V. Dyadichev, S.G. Menyuk, D.S. Menyuk

#### DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODEL FOR IMPROVING THE SYSTEM OF PASSIVE HEAT REMOVAL FROM THE HOLDING POOL WITH A TWO-PHASE RING THERMOSIPHON

*The purpose of this study is to create a computer model that will be used to improve the passive heat removal system from the holding pool with a two-phase annular thermosiphon. This model will allow you to analyze the operation of the system, determine a set of quasi-optimal solutions for its parameters and improve the efficiency of heat removal. The development of such a model can help improve heat transfer processes and improve the efficiency of the system as a whole. **Method.** To solve this problem, mathematical and computer modeling methods were used, the mechanisms of heat transfer in the system were studied and optimal parameters for effective heat removal were determined, as well as various design options and system parameters were compared to select the most effective solution. The use of these methods provided an integrated approach to the development and improvement of a passive heat removal system with a two-phase ring thermosiphon. **Result.** A computer model has been developed to improve the system of passive heat removal from the holding pool with a two-phase annular thermosiphon. This model allows you to analyze the operation of the system, improve its parameters and improve the efficiency of heat removal. Creating such a model is an important step in the development and improvement of the system, allowing you to more accurately predict its performance and make the necessary improvements. **Conclusion.** The developed computer model can be used for further research, improvement of heat removal processes and increase the efficiency of the system as a whole. It allows you to study the heat removal processes in more detail and adjust the operation of the system. The model provides an opportunity to perform numerical calculations, analyze various scenarios and evaluate the effectiveness of changes in system parameters.*

*Simulation computer model; passive heat removal system; fuel pool cooling system.*

**Введение.** После выгорания ядерного топлива в активной зоне реактора, его нужно переместить в специальные бассейны хранения, где оно будет находиться определенное время для остывания и снижения радиоактивности. Этот процесс называется хранением отработавшего ядерного топлива. В приреакторном бассейне отработавшее топливо находится под водой в течении долгого времени, что позволяет снизить уровень радиоактивности и предотвратить возможные аварийные ситуации. Вода в бассейне также обеспечивает охлаждение топлива, снижая его тепловыделение.

Конструктивные решения компоновки БВиП (бассейнов для выдержки и переработки отработавшего ядерного топлива) соответствуют высоким требованиям ядерной безопасности. В проекте энергоблоков с реакторной установкой В-491 предусмотрены системы для организации теплоотвода от отработавших топливных сборок. Эти системы обеспечивают эффективное охлаждение отработавшего топлива, предотвращая перегрев и минимизируя

риски повреждения оболочки топлива риски возгорания или других аварийных ситуаций. Также в проекте предусмотрены системы, которые дублируют полностью или частично функции систем теплоотвода при возникновении аварийных ситуаций.

Системы активной безопасности, которые требуют вмешательства человека или внешних источников энергии для своего функционирования, могут оказаться недостаточно эффективными в случае крупных аварий, таких как авария на АЭС Фукусима-1.

Авария на 4-м энергоблоке АЭС Фукусима-1 была вызвана рядом серьезных проблем, которые привели к расплавлению отработавшего ядерного топлива в бассейне выдержки и перегрузки. Эта авария показала, что использование только активных систем охлаждения ОЯТ может оказаться недостаточными в экстремальных ситуациях. Одной из основных причин аварии было выкипание воды, охлаждающей отработавшие тепловыделяющие сборки, что привело к оголению отработавших топливных сборок и плавлению топлива. Последующее выделение водорода вследствие пароциркониевой реакции и взрыв способствовали выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду [1–3].

Эта авария подчеркнула важность не только обеспечения эффективности систем теплоотвода и безопасности в ядерных энергетических установках, но и необходимость учета возможности каскадных отказов и сценариев аварий при проектировании и эксплуатации ядерных реакторов.

Одним из ключевых элементов обеспечения безопасности в ядерной энергетике являются пассивные системы безопасности. Такие системы представляют собой замкнутый контур естественной циркуляции двухфазного теплоносителя. Их принцип действия основан на использовании физических законов для эффективного отведения теплоты от оборудования или систем, где требуется охлаждение. Система пассивного отвода тепла (СПОТ) на АЭС представляет собой систему, которая использует естественные физические процессы для охлаждения без необходимости в активных механизмах или источниках энергии. Ключевую роль в ее работе играют наклонные теплообменные трубки, обеспечивающие эффективный теплообмен. Наклонное расположение трубок способствует естественной конвекции и эффективному отводу тепла. Теплообменные трубки погружены в бассейн с водой, который служит в качестве теплоприемника. Вода в бассейне охлаждается за счет естественной конвекции и испарения. Вся система размещена в герметичном корпусе, который защищает ее от внешних воздействий и обеспечивает необходимые условия для работы. Для улучшения теплообмена и испарения воды в бассейне предусмотрена система естественной вентиляции, которая обеспечивает циркуляцию воздуха вокруг теплообменных трубок.

Современные энергоблоки атомных электростанций (АЭС) с реакторами ВВЭР-1200 (проект В-491) оснащены системой пассивного отвода тепла, которая состоит из независимых каналов, каждый из которых способен обеспечить эффективное отведение тепла от реактора. Такая многоканальная система повышает надежность работы СПОТ и минимизирует риски при возникновении нештатных ситуаций. Согласно технической документации, максимальная величина остаточных тепловыделений в реакторе ВВЭР-1200 составляет 19,5 МВт.

В рамках настоящего исследования разработать компьютерную модель, которая будет раскрывать потенциал геометрических параметров теплообменных трубок СПОТ с целью увеличения эффективности отвода тепла и повышения безопасности работы АЭС. Данное исследование посвящено изучению влияния изменения диаметра теплообменных трубок и величины угла их наклона на зависимость отводимой мощности тепловыделений в системе пассивного отвода тепла (СПОТ) для энергоблоков АЭС с реактором ВВЭР-1200.

На энергоблоках с ВВЭР-1200 (В-491) применяются различные системы теплоотвода от бассейна выдержки и перегрузки топлива для обеспечения безопасности и эффективности хранения отработавшего ядерного топлива. Некоторые из основных систем включают:

1. Система охлаждения бассейна выдержки: эта система обеспечивает постоянное охлаждение отработавшего топлива, чтобы предотвратить его перегрев и обеспечить стабильные условия хранения.

2. Система контроля уровня воды: система, которая следит за уровнем воды в бассейне выдержки и поддерживает его на необходимом уровне для эффективного охлаждения отработавшего топлива.

3. Система фильтрации и очистки воды: для обеспечения чистоты и качества воды в бассейне выдержки применяются системы фильтрации и очистки, которые удаляют загрязнения и радиоактивные частицы.

4. Системы аварийного охлаждения: дополнительные системы, которые могут включаться автоматически в случае аварийных ситуаций, чтобы обеспечить дополнительное охлаждение отработавшего топлива.

Эти системы работают в комплексе для обеспечения безопасного и эффективного хранения отработавшего ядерного топлива на энергоблоках с ВВЭР-1200 (В-491). Они играют ключевую роль в обеспечении ядерной безопасности и предотвращении потенциальных аварийных ситуаций.

Система охлаждения топливного бассейна (ФАК) имеет ряд важных функций, которые обеспечивают безопасность и эффективность эксплуатации ядерной установки. Ниже перечислены основные цели и задачи системы охлаждения топливного бассейна. Система ФАК предназначена для эффективного охлаждения отработавших сборок, находящихся в топливном бассейне, во всех режимах эксплуатации, включая аварийные ситуации. Она помогает создать радиационно-защитный слой над топливными сборками в шахте реактора, топливном бассейне и колодце перегрузки, что снижает уровень радиационного воздействия на персонал. Данная система используется для заполнения и опорожнения шахты реактора во время работ по перегрузке топлива и других технологических операций. Система обеспечивает возможность заполнения и опорожнения топливного бассейна и колодца перегрузки при проведении работ по ремонту и обслуживанию. Трубопроводы системы ФАК могут использоваться для подачи воды от спринклерных насосов для заполнения шахты ревизии ВКУ во время проведения работ по перегрузке топлива или послеаварийных мероприятий.

Каждый из двух независимых каналов системы охлаждения топливного бассейна (ФАК) состоит из компонентов, обеспечивающих эффективное охлаждение отработавшего топлива и выполнение других функций системы:

1. Насос ФАК10(40) AP001, который обеспечивает циркуляцию охлаждающей жидкости (обычно воды) в системе, помогая отводить тепло от отработавших кассет.

2. Теплообменник ФАК10(40) AC001, обеспечивает теплообмен между охлаждающей жидкостью из системы и отработавшим топливом, помогая охлаждать его.

3. Заборный и раздающие коллекторы, они обеспечивают распределение охлаждающей жидкости между различными участками системы, включая топливные кассеты.

4. Арматура: клапаны, задвижки и другая арматура, которая регулирует поток охлаждающей жидкости и обеспечивает безопасную эксплуатацию системы.

5. Трубопроводы, которые соединяют все компоненты системы и обеспечивают циркуляцию охлаждающей жидкости по всей системе.

Каждый из этих компонентов играет важную роль в работе системы охлаждения топливного бассейна и обеспечивает выполнение всех функций, необходимых для эффективного охлаждения отработавшего топлива и обеспечения безопасности ядерной установки. Двойное выполнение системы обеспечивает надежность и защиту от отказов в работе [4–7].

**Основная часть.** На данный момент энергоблоки российского производства, включая энергоблоки с ВВЭР-1200, обладают системами охлаждения топливного бассейна ФАК, которые предназначены для отвода теплоты от отработавших топливных сборок. Однако наработанный опыт в области эксплуатации АЭС показал, что необходимо также вносить в новые и существующие проекты энергоблоков системы пассивного отвода тепла в т.ч. и для топливного бассейна. Эти системы спроектированы для обеспечения безопасности и эффективности хранения отработавшего ядерного топлива и предотвращения катастрофических сценариев, подобных аварии на АЭС Фукусима-1.

Однако, несмотря на наличие систем охлаждения топливного бассейна на российских энергоблоках, важно продолжать усовершенствование и совершенствование систем безопасности ядерных установок, чтобы минимизировать риски возникновения серьезных аварийных ситуаций.

Энергоблоки с ВВЭР-1200 имеют свои особенности и уникальные системы безопасности, которые должны обеспечивать безопасность и надежность их эксплуатации. Российские ядерные специалисты и инженеры продолжают работать над совершенствованием систем безопасности и обеспечением надежной и безопасной работы ядерных энергетических установок.

Одним из таких решений являются пассивные системы безопасности. Такая система, представляет собой замкнутый контур естественной циркуляции двухфазного теплоносителя, используется для охлаждения систем или оборудования, где требуется эффективное отведение теплоты. В данной системе присутствуют три основных участка: испарительный, конденсационный и транспортный (рис. 1).

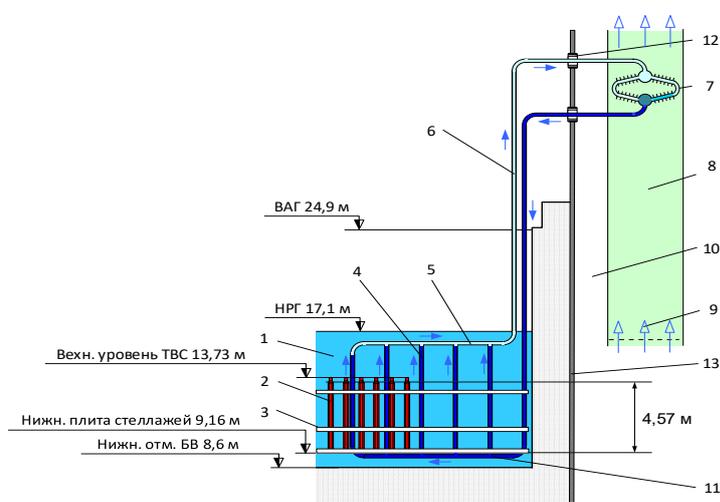


Рис. 1. Схема автономной системы пассивного отвода тепла бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива (СПОТ) на основе кольцевого двухфазного термосифона (КДТС): 1 – топливный бассейн, 2 – ТВС, 3 – плита стеллажей, 4 – испаритель наружной поверхности, 5 – коллектор, 6 – трубопровод, 7 – конденсатор, 8 – атмосфера, 9 – поток атмосферного воздуха, 10 – конденсатный трубопровод, 11 – раздающий коллектор, 12 – гермопроходка, 13 – гермооболочки

Системы охлаждения топливного бассейна (ФАК) на энергоблоках имеют ряд важных функций, включая отвод остаточных тепловыделений от отработавших топливных сборок, обеспечение радиационной защиты, заполнение и опорожнение шахт реактора, а также другие технологические операции [8–10].

Для решения поставленной задачи был использован RELAP5, который является одним из распространенных и широко используемых кодов для моделирования ядерных реакторов и систем охлаждения в ядерной энергетике [11–13].

**Описание модели.** Нодализационная схема модели СПОТ включает в себя основные элементы системы и оборудования, которые важны для моделирования и анализа процессов в тепловой электростанции. Она позволяет операторам и инженерам ясно представлять структуру системы, а также проводить анализ и моделирование различных сценариев работы и аварийных ситуаций (рис. 2).

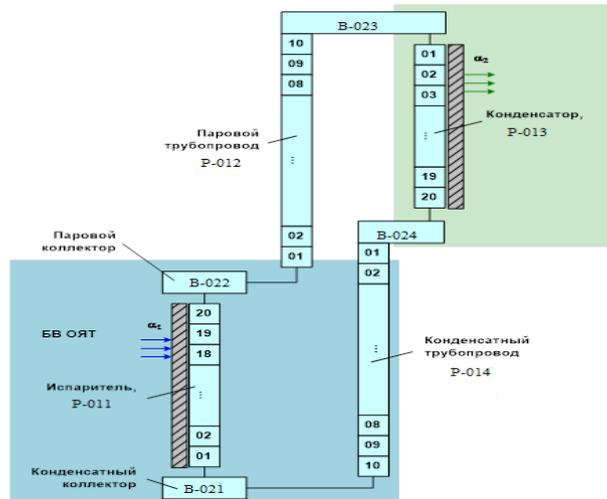


Рис. 2. Нодализация схема контура системы пассивного отвода тепла бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива

Испаритель представлен гидродинамическим элементом типа *pipe*. На рисунке испарительному участку соответствуют участки *pipe-11* с номерами от 01 до 20. Разбиение испарителя по высоте было необходимо для учета изменения паросодержания и скоростей фаз по длине (высоте) испарительных каналов. Предварительные расчеты продемонстрировали, что минимально необходимое количество элементарных расчетных объемов составляет ~15..20. Дальнейшая детализация не оказывает влияния на получаемые результаты, но приводит к увеличению расчетного времени.

Длина каждого расчетного участка принята равной 0,22 м. Таким образом, полная длина каждой испарительной трубки составляет 4,40 м. Это позволяет разместить испаритель с коллекторами по высоте между нижней и верхней плитами стеллажей хранения ОЯТ в БВ.

Проходное сечение *i*-го участка, в случае трубчатого испарителя, вычисляется по формуле:

$$S_i = k \cdot N \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}, \quad (1)$$

где  $d_i = d$  – внутренний диаметр одной трубки.

Гидравлический диаметр каждого участка, в случае трубчатого испарителя, равен геометрическому внутреннему диаметру одной трубки  $d$  и, при использовании трубного пучка  $16 \times 1,5$ , составляет 0,013 м. В случае канала некруглого сечения, эквивалентный гидравлический диаметр элементарного расчетного объема вычисляется по формуле:

$$D_{Hi} = 4 \cdot \frac{V_i}{S_{wi}}, \quad (2)$$

где  $V_i$  – объем *i*-го расчетного элемента,

$S_{wi}$  – площадь смоченной боковой поверхности *i*-го расчетного элемента.

Наклон теплообменных трубок задается величиной угла  $\alpha$  (в отдельности для каждого участка). Поскольку преобладающее течение предполагается восходящим, вертикальному расположению соответствует значение  $\alpha = +90^\circ$ .

Площади связей между участками по умолчанию принимаются равными минимальной из площадей проходных сечений смежных участков.

Контур представлен гидродинамическим элементом типа *pipe* и *branch*. На рисунке собственно паропроводу соответствуют участки *pipe-12*.

Варьируя длины и углы наклона участков *pipe-12*, можно изменять длину паропровода и разность высотных отметок между испарителем и конденсатором в соответствии с формулой:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^N L_i \cdot \sin(\alpha_i), \quad (3)$$

где  $L_i$  – длина  $i$ -го участка,

$\alpha_i$  – угол наклона  $i$ -го участка в градусах,

$N$  – количество трубок испарителя (испарительных каналов).

Элемент *branch* с номером 22 соответствует сборному (выходному) паровому коллектору испарителя, элемент *branch* с номером 23 – раздающему (входному) паровому коллектору конденсатора.

Конденсатор представлен гидродинамическим элементом типа *pipe*. На рисунке испарительному участку соответствуют участки *pipe-13*.

Оптимальное количество элементарных расчетных объемов было выбрано из тех же соображений, что и для испарителя. В окончательном варианте модели число элементарных расчетных объемов принято равным 20.

Длина каждого расчетного участка принята равной 0,22 .. 2,2 м. Таким образом, полная эффективная длина каждой трубки конденсатора составляет 4,40 ... 44,0 м.

Прходное сечение  $i$ -го участка, в случае трубчатого конденсатора, вычисляется по формуле:

$$S_i = k \cdot N \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}, \quad (4)$$

где  $d_i = d$  – внутренний диаметр одной трубки,

$N$  – количество трубок испарителя (испарительных каналов),

$k$  – количество трубок конденсатора (конденсационных каналов), приходящихся на одну трубку испарителя (один испарительный канал). Таким образом, геометрические характеристики испарителя и конденсатора, вообще говоря, могут быть различны [14–16].

Гидравлический диаметр каждого участка рассчитывался по тем же формулам, что и для элементарных расчетных объемов испарителя.

Наклон теплообменных трубок задается величиной угла  $\alpha$  (в отдельности для каждого участка). Поскольку преобладающее течение предполагается нисходящим, вертикальному расположению соответствует значение  $\alpha = -90^\circ$ .

Площади связей между участками по умолчанию принимаются равными площадям проходных сечений смежных участков.

Модель конденсатного трубопровода представлена элементами гидродинамическим элементом типа *pipe* (номер 14) и *branch* (с номерами 24 и 21). Она аналогична модели паропровода. Отличие заключается в величинах проходных сечений и гидравлических диаметров расчетных участков. Длины и разницы высотных отметок соответствующих расчетных участков рассчитывались так же, как и в модели паропровода. При задании высотных отметок, было обеспечено замыкание циркуляционного контура по высоте.

Элемент *branch* с номером 24 соответствует сборному (выходному) коллектору конденсатора, элемент *branch* с номером 21 – раздающему (входному) коллектору испарителя.

Теплообменные поверхности испарителя и конденсатора представлены тепловыми структурами (*heat structures*), схематически показанными на рисунке. Для удобства, номера тепловых структур выбраны такими же, как и номера соответствующих гидродинамических элементов.

Для удобства обработки результатов, в модель были введены диагностические переменные, позволяющие непосредственно вычислить «интегральные» параметры СПОТ и её элементов. В соответствии с синтаксисом программы, диагностическая переменная может быть обозначена мнемоническим символом CV (*Control Variable*) и идентифицируется уникальным трех- или четырехзначным номером (по выбору разработчика модели). При разработке модели использовалась 4-значная нумерация.

В частности, установившееся (эффективное) заполнение испарителя определялось как

$$CV0011 = \frac{1}{N_L} \cdot \sum_{i=1}^N L_i \cdot voidf\_012i0000, \quad (5)$$

где  $voidf\_012i0000$  – относительное объемное содержание воды (жидкой фазы) в  $i$ -м расчетном объеме элемента *pipe-12*,  $N$  – количество расчетных объемов, из которых состоит *pipe-12* (на Рис. .2  $N=20$ ),

$$L = \sum_{i=1}^N L_i, \quad (6)$$

где  $L_i$  – длина  $i$ -го расчетного объема,

$$CV0016 = \frac{1}{NL} \cdot \sum_{i=1}^N L_i \cdot \text{voidf\_012i0000} \quad (7)$$

и так далее.

В случае параллельных каналов, можно ввести также средневзвешенное заполнение, определяемое как среднее заполнение индивидуальных каналов. В этом случае весовые коэффициенты пропорциональны площадям проходных сечений (или объемам) элементарных ячеек, а сумма всех весовых коэффициентов для параллельных каналов нормируется на единицу. Данный параметр полезен при расчете системы с пластинчатым испарителем, в котором сечения периферийных и центрального каналов различны [17–19].

Мощность, отводимая СПОТ в стационарном режиме, может быть определена по формуле

$$CV0021 = A \cdot \sum_{i=1}^N q_{0120i0000}, \quad (8)$$

где  $q_{0120i0000}$  – тепловая мощность (Вт), подводимая от тепловых структур к  $i$ -му расчетному объему ГЭ с номером 012, в данном случае *pipe-11*.

$A = 1 \cdot 10^{-6}$  введен в формулу для того, чтобы суммарное значение мощности, при выводе в выходной файл, автоматически пересчитывалось в МВт.

Для того, чтобы режим работы СПОТ был полностью определен, необходимо либо дополнить модель БВ с ОЯТ со стороны теплообменника-испарителя, а также моделью атмосферы со стороны теплообменника-конденсатора, либо задать граничные условия на внешних поверхностях теплообменника-испарителя и теплообменника-конденсатора. Первый путь приемлем при проработке окончательного проекта системы. В то же время, при расчете характеристик СПОТ затраты вычислительных ресурсов оказываются неприемлемо большими, особенно учитывая необходимость выполнения значительного количества вариантных расчетов. Поэтому был реализован второй вариант.

Во всех случаях, начальные расходы сред внутри контура полагались равными нулю, контур был частично заполнен водой (из условия начального заполнения испарителя ~40 %), частично – водяным паром. Начальная температура пароводяной смеси в контуре принималась равной +100 °С, что диктовалось исключительно соображениями устойчивости расчетной схемы, реализованной в программе RELAP5. Затем система, находясь автономном состоянии, после чего приходила к стационарному состоянию в соответствии с заданными граничными условиями.

В начальный период времени также включался «искусственный регулятор», позволявший корректировать заполнение контура теплоносителем. Работа регулятора основана на том, что в один из элементарных объемов конденсатного трубопровода (для определенности в *branch-21*) подавался или отбирался теплоноситель. Параметры подаваемого теплоносителя были в точности равны параметрам смеси в элементе *branch-21*, а расход ограничивался величиной, не превышающей по абсолютной величине 5% от расхода естественной циркуляции в контуре.

После достижения заданной массы (внутренняя переменная *sysms-1*), искусственный регулятор отключался. В дальнейшем расчет продолжался до достижения стационарного режима работы системы, то есть до полной стабилизации параметров теплопереноса (не считая короткопериодических флуктуаций, характерных для работы двухфазных термосифонных контуров).

После достижения стационарного режима, определялись степени заполнения расчетных элементов, параметры сред в них, передаваемая мощность, коэффициенты теплоотдачи от внутренних поверхностей теплообменных каналов к теплоносителю термосифонного контура и др. Выполнив серию расчетов для ряда фиксированных заполнений контура (по массе), устанавливалась связь между интересующими нас параметрами, например разностью температур греющей и охлаждающей внешних сред, степенью заполнения испарителя и передаваемой мощностью [20–21].

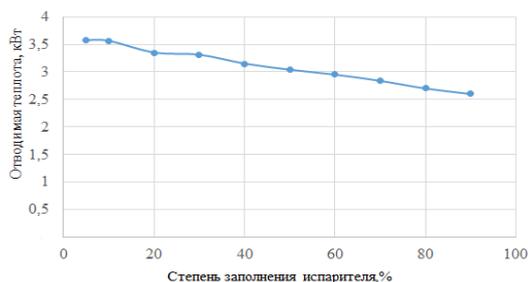


Рис. 3. Отводимая теплота вертикальной трубчаткой Ду 20

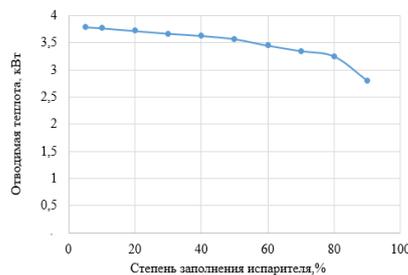


Рис. 4. Отводимая теплота трубчаткой Ду 20 с углом наклона 6

В начале был рассмотрен КДТС в контуре которого и испаритель и конденсатор собраны на основе теплообменных трубок  $25 \times 2,5$  мм (Ду20). Высота испарителя и конденсатора принималась одинаковой, при этом для определенности конденсатор был расположен на 5 м выше чем испаритель. В качестве независимого параметра принималась относительная степень заполнения испарительного участка, степень заполнения варьировалась от 5 до 90%. Теплоносителем в контуре КДТС является вода.

На графике (рис. 3) приведена отводимая мощность из расчета на 1 трубку испарительной секции, видно, что оптимальное заполнение находится от 5 до 30% процентов. В этом диапазоне КДТС обладает низкой чувствительностью к заполнению т.е. изменение отводимой мощности не превышает 5%. При этом объемная фракция конденсата в конденсаторе КДТС не превышает 3,5%, а время прохода жидкой и паровой фазы в конденсаторе составляет 0,75 и 9,45 м/с, соответственно.

С целью увеличения времени прохождения теплоносителя через конденсатор на эффективность работы контура КДТС вертикальные трубки КДТС были заменены на наклонные с углом наклона 10 градусов, благодаря этому длина конденсатного участка увеличилась в 10 раз (с 4.4 м до 44 м) при неизменных высотных отметках контура. Результаты для данного расчета приведены на рис. 4.

Несмотря на увеличившееся время прохождения смеси через конденсатор величина отводимой мощности практически не изменилась.

Как вариант, был рассмотрен контур, в котором испарительная секция была собрана из трубчатки  $16 \times 1,5$  мм (Ду13). Остальные параметры системы не изменялись. Результаты расчетов передаваемой мощности как функции заполнения представлены на рис. 5 (конденсатор с вертикальной трубчаткой) и рис. 6 (конденсатор с наклонной трубчаткой).

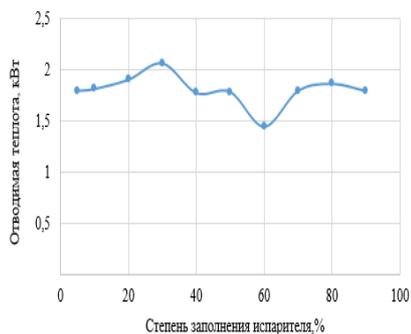


Рис. 5. Отводимая теплота вертикальной трубчаткой Ду 13

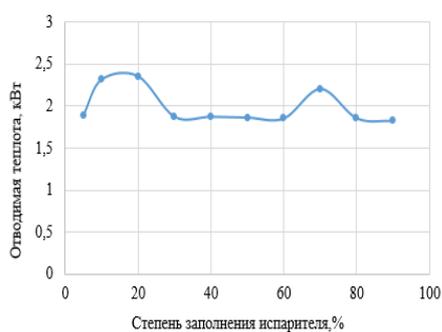


Рис. 6. Отводимая теплота трубчаткой Ду 13 с углом наклона 6

Отводимая мощность из расчета на одну трубку при оптимальном заполнении изменилась с 1,8 кВт на 2,4 кВт зависимость отводимой мощности от заполнения приняла немонотонный характер. Первый оптимум приходится на заполнение 5-40%. В то же

время, если принять шаг трубочки  $1,35d_{\text{вн}}$ , то плотность трубного пучка, собранная из трубок Ду 13 мм, в 2,4441 раза больше, нежели из трубок Ду 20 мм, соответственно, во столько же раз изменится величина отводимой мощности при тех же габаритных размерах испарительной секции.

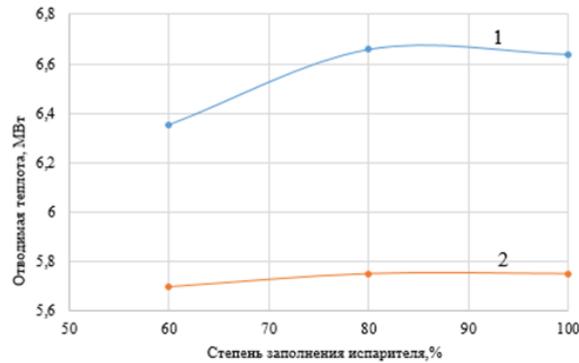


Рис. 7. Отводимая теплота одной петлей СПОТ: 1 – с трубочкой Ду 13 мм; кривая 2 – с трубочкой Ду 20 мм

Созданная имитационная компьютерная модель предназначена для анализа и оптимизации работы системы пассивного отвода тепла с использованием двухфазного кольцевого термосифона. При достижении в бассейне охладителя и, соответственно, в герметичном испарительном теплообменнике заданной для теплоотвода температуры, в верхней части теплообменника скапливаются пары жидкости, которые создают избыточное давление и выталкивают рабочую жидкость через обратный паровой трубопровод пароводяной смеси во внешний герметичный конденсаторный теплообменник, размещен на куполе энергоблока в специальном помещении, где имеет неограниченный запас среды для сброса теплоты. Рабочая среда, проходя через пространство приреакторного бассейна, нагреваясь отбирает тепло у воды топливного бассейна, испаряется, пар рабочей среды поднимается по подъемном трубопроводам, конденсируется в конденсаторе предлагаемой среды, а затем конденсат поступает обратно в опускной участок системы к бассейну.

Отвод тепла производится путем охлаждения воздухом корпуса теплообменника непосредственно и через его ребра. Модель позволяет определить наиболее подходящий диапазон заполнения системы и диапазон КДТС, при котором система обладает низкой чувствительностью к изменениям охлаждаемой среды. Это позволяет улучшить эффективность отвода тепла и повысить производительность системы. Модель может быть использована для проведения различных тестов и исследований, а также для обоснования технических решений по совершенствованию системы отвода тепла.

**Выводы.** В целях повышения эффективности и безопасности работы АЭС разработана компьютерная модель, определяющая набор квазиоптимальных решений для геометрических параметров теплообменных трубок системы пассивного отвода тепла от бассейна выдержки с использованием двухфазного кольцевого термосифона. Модель позволяет проводить детальный анализ работы системы, выявляя ее сильные и слабые стороны, а также проводить улучшение ключевых параметров для достижения максимальной эффективности отвода тепла.

В ходе проведенных исследований было установлено, что использование трубок Ду 13 мм вместо Ду 20 привело к увеличению отводимой мощности на одну трубку с 1,8 кВт до 2,4 кВт. Каждый канал системы способен отвести порядка 7 МВт тепловой энергии. Это означает, что вся система отводит 21 МВт, что превышает установленные нормативы величины остаточных тепловыделений на 7,6%.

Таким образом предлагаемая система пассивного отвода теплоты при заполнении 85 %, и использовании в качестве конструктивного элемента трубочки с внутренним диаметром 13 мм, заполненная водой, гарантированно справляется с остаточными тепловыделениями, когда в топливный бассейн аварийно выгружается вся активная зона, но

она не способна обеспечить требуемые параметры среды при работе в условиях нормальной эксплуатации. Для того, чтобы внедрить ее в эксплуатацию при нормальных условиях необходимо провести исследования, используя предлагаемую модель, где в качестве теплоносителя выступить вещество с пониженной температурой кипения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Букринский А.М. Безопасность атомных станций по федеральным нормам и правилам России и стандартам МАГАТЭ. Сравнение основных принципов и требований по обеспечению безопасности. – 3-е изд. М.: НТЦ ЯРБ, 2019. – 196 с.
2. Дмитриев С.М. [и др.]. Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 151-162. – <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162>.
3. Сорокин В.В. Расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализуемой системы безопасности АЭС с ВВЭР // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, №. 1. – С. 67-75.
4. Морозов А.В. [и др.]. Пути совершенствования системы пассивного охлаждения активной зоны реактора ВВЭР // Матер. XIV Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса», Саратов, 30 октября - 1 ноября 2018. – Саратов, 2018. – С. 115-120.
5. Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1624. Vienna: IAEA, 2009. Mode of access: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1624\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1624_web.pdf) (Date of access: 07.01.2022).
6. Natural circulation in water cooled nuclear power plants: Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments. IAEA-TECDOC-1474. Vienna: IAEA, 2005. Mode of access: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE\\_1474\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf) (Date of access: 05.01.2022).
7. Sierchula J. Analysis of passive residual heat removal system in AP1000 nuclear power plant // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 214. Art. ID 012095. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012095>.
8. Li Feng [et al.]. Design, Experiment, and Commissioning of the Passive Residual Heat Removal System of China's Generation III Nuclear Power HPR1000 // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2021. – 6 p. – <https://doi.org/10.1155/2021/6680400>.
9. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы: пер. с англ. Ю.А. Зейгарник. – М.: Энергия, 1979. – 272 с.
10. и С. Тепловые трубы: Теория и практика: пер. с англ. В.Я. Сидоров. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
11. Vijayan P.K., Nayak A.K., Kumar N. Chapter 1 - Natural circulation loops - advantages, challenges, and classification // Single-Phase, Two-Phase and Supercritical Natural Circulation Systems. – Woodhead Publishing, 2019. – P. 1-30. – <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102486-7.00001-9>.
12. Sviridenko I.I. [et al.]. Passive Residual Heat Removal System for WWER with the Thermosiphon Heatexchange Equipment // International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2015. – Vol. 16, No. 1-4. – P. 209-223. – <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2015015683>.
13. Свириденко И.И., Шевелев Д.В., Свердлов В.В. Расчетные исследования аварийного теплоотвода ВВЭР автономной термосифонной СПОТ первого контура // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: Науч.-тех. сб. – Сосновый Бор: ФГУП НИТИ, 2018. – Вып. 3 (13). – С. 28-41.
14. Свириденко И.И. Удержание реактора в подкритическом состоянии при запроектной аварии одно-временным расхолаживанием и декомпрессией первого контура // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 85-96. – <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.08>.
15. Инструкция по ликвидации аварий и аварийных ситуаций на реакторной установке энергоблока № 5 Запорожской АЭС. 05.ГТ.00.ИЭ.11. ОП «Запорожская АЭС», 2017. – 444 с.
16. Васильев, Л.Л. Теплообменники на тепловых трубах. – Минск: Наука и техника, 1981. – 143 с.
17. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О., Факт К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. – 2005. – 704 с.
18. АЭС «Куданкулам». Классификация систем, оборудования, трубопроводов и элементов тепло-технической части. КК.UJA.0.SR.PZ.PR004. Институт «Атомэнергопроект», 2002.
19. Благовещенский А.Я. [и др.]. Концепция расширенного использования естественной циркуляции теплоносителя первого контура в энергоблоках с ВВЭР-1000 (1200) и перспективы ее реализации // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: Матер. 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23-25 мая 2012 г. – М.: Концерн «Росэнергоатом», 2012. – С. 602-605.

20. Букин Н.В. [и др.]. Влияние пассивных систем на протекание типичных запроектных аварий РУ В-392 // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Матер. 2-й науч.-техн. конф., Подольск, 19-23 ноября 2001 г. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2001/report1/vrsnptza.pdf> (дата доступа: 17.09.2021).
21. Андрущечко С.А. [и др.]. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010. – 603 с.

## REFERENCES

1. Bukrinskiy A.M. Bezopasnost' atomnykh stanciy po federal'nym normam i pravilam Rossii i standartam MAGATE. Sravnenie osnovnykh principov i trebovaniy po obespecheniyu bezopasnosti [Safety of nuclear power plants according to federal norms and rules of Russia and IAEA standards. Comparison of the basic principles and requirements for safety]. 3rd ed. Moscow: NTC YaRB, 2019, 196 p.
2. Dmitriev S.M. [i dr.]. Issledovanie lokal'noy gidrodinamiki teplonositelya v smeshannoy aktivnoy zone reaktora VVER [Investigation of the local hydrodynamics of the coolant in the mixed core of the VVER reactor], *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG* [Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2020, Vol. 63, No. 2, pp. 151-162. Available at: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162>.
3. Sorokin V.V. Raschet vremeni puska passivnogo kataliticheskogo rekombinatora vodoroda lokalizuyushchey sistemy bezopasnosti AES s VVER [Calculation of the start-up time of the passive catalytic hydrogen recombinator of the localized safety system of nuclear power plants with VVER], *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG* [Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2022, Vol. 65, No. 1, pp. 67-75.
4. Morozov A.V. [i dr.]. Puti sovershenstvovaniya sistemy passivnogo okhlazhdeniya aktivnoy zony reaktora VVER [Ways to improve the passive cooling system of the VVER reactor core], *Mater. XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferencii «Problemy sovershenstvovaniya toplivno-energeticheskogo kompleksa», Saratov, 30 oktyabrya - 1 noyabrya 2018* [Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference "Problems of improving the fuel and energy complex", Saratov, October 30 - November 1, 2018]. Saratov, 2018, pp. 115-120.
5. Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1624. Vienna: IAEA, 2009. Mode of access: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1624\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1624_web.pdf) (Date of access: 07.01.2022).
6. Natural circulation in water cooled nuclear power plants: Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments. IAEA-TECDOC-1474. Vienna: IAEA, 2005. Mode of access: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE\\_1474\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf) (Date of access: 05.01.2022).
7. Sierchula J. Analysis of passive residual heat removal system in AP1000 nuclear power plant, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 214. Art. ID 012095. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012095>.
8. Li Feng [et al.]. Design, Experiment, and Commissioning of the Passive Residual Heat Removal System of China's Generation III Nuclear Power HPR1000, *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2021, 6 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/6680400>.
9. Dan P.D., Rey D.A. Teplovye trubyy [Heat pipes], transl. from Engl. by. Yu.A. Zeygarnik. Moscow: Energiya, 1979, 272 p.
10. Chi S. Teplovye trubyy: Teoriya i praktika [Heat pipes: Theory and practice]: transl. from Engl. by. V.Ya. Sidorov. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981, 207 p.
11. Vijayan P.K., Nayak A.K., Kumar N. Chapter 1 - Natural circulation loops - advantages, challenges, and classification, *Single-Phase, Two-Phase and Supercritical Natural Circulation Systems*. Woodhead Publishing, 2019, pp. 1-30. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102486-7.00001-9>.
12. Sviridenko I.I. [et al.]. Passive Residual Heat Removal System for WWER with the Thermosiphon Heatexchange Equipment, *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2015, Vol. 16, No. 1-4, pp. 209-223. Available at: <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2015015683>.
13. Sviridenko I.I., Shevelev D.V., Sverdlov V.V. Raschetnye issledovaniya avariynogo teplootvoda VVER avtonomnoy termosifonnoy SPOT pervogo kontura [Computational studies of the emergency heat sink of the VVER autonomous thermosiphon SPOT of the first circuit], *Tekhnologii obespecheniya zhiznennogo tsikla yadernykh energeticheskikh ustanovok: Nauch.-tekh. sb.* [Technologies for ensuring the life cycle of nuclear power plants: scientific and technical collection]. Sosnovyy Bor: FGUP NITI, 2018, Issue 3 (13), pp. 28-41.

14. *Sviridenko I.I.* Uderzhanie reaktora v podkriticheskom sostoyanii pri zaproektnoy avarii odnovremennym raskholazhivaniem i dekompressiey pervogo kontura [Keeping the reactor in a subcritical state in case of an out-of-design accident by simultaneous cooling and decompression of the primary circuit], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika* [News of higher educational institutions. Nuclear energy], 2019, No. 1, pp. 85-96. Available at: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.08>.
15. Instruktsiya po likvidatsii avariy i avariynykh situatsiy na reaktornoy ustanovke energobloka № 5 Zaporozhskoy AES. 05.GT.00.IE.11. OP «Zaporozhskaya AES», 2017 [Instructions for the elimination of accidents and emergencies at the reactor unit of power unit No. 5 of the Zaporizhia NPP. 05.GT.00.IE.11. OP "Zaporizhia NPP", 2017], 444 p.
16. *Vasil'ev, L.L.* Teploobmenniki na teplovykh trubakh [Heat exchangers on heat pipes]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1981, 143 p.
17. *Bezrodnuy M.K., Pioro I.L., Kostyuk T.O., Fakt K.* Protsessy perenosa v dvukhfaznykh termosifonnykh sistemakh. Teoriya i praktika [Transfer processes in two-phase thermosiphon systems. Theory and practice], 2005, 704 p.
18. AES «Kudankulam». Klassifikatsiya sistem, oborudovaniya, truboprovodov i elementov teplo-tekhnicheskoy chasti. KK.UJA.0.SR.PZ.PR004. Institut «Atomenergoproekt», 2002 [Kudankulam NPP. Classification of systems, equipment, pipelines and elements of the thermal engineering part. KK.UJA.0.SR.PZ.PR004. Atomenergoproekt Institute, 2002].
19. *Blagoveshchenskiy A.Ya.* [i dr.]. Kontseptsiya rasshirennogo ispol'zovaniya estestvennoy tsirkulyatsii teplositelya pervogo kontura v energoblokakh s VVER-1000 (1200) i perspektivy ee realizatsii [The concept of expanded use of natural circulation of the primary coolant in power units with VVER-1000 (1200) and prospects for its implementation], *Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoy energetiki: Mater. 8-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Moskva, 23-25 maya 2012 g.* [Safety, efficiency and economics of nuclear energy: Materials of the 8th International Scientific and Technical Conference. Conf., Moscow, May 23-25, 2012]. Moscow: Kontsern «Rosenergoatom», 2012, pp. 602-605.
20. *Bukin N.V.* [i dr.]. Vliyaniye passivnykh sistem na protekanie tipichnykh zaproektnykh avariyy RU V-392 [The influence of passive systems on the course of typical out-of-design accidents of RU V-392], *Obespechenie bezopasnosti AES s VVER: Mater. 2-y nauch.-tekhn. konf., Podol'sk, 19-23 noyabrya 2001 g.* [Ensuring the safety of nuclear power plants with VVER: materials of the 2nd scientific and technical Conference, Podolsk, November 19-23, 2001]. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2001/report1/vpsnptza.pdf> (accessed 17 September 2021).
21. *Andrushechko S.A.* [i dr.]. AES s reaktorom tipa VVER-1000. Ot fizicheskikh osnov ekspluatatsii do evolyutsii proekta [Nuclear power plant with a VVER-1000 reactor. From the physical foundations of operation to the evolution of the project]. Moscow: Logos, 2010, 603 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

**Дядичев Валерий Владиславович** – Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; e-mail: [mr.dyadichev@mail.ru](mailto:mr.dyadichev@mail.ru); г. Симферополь, Россия; кафедра компьютерной инженерии и моделирования; д.т.н.; профессор.

**Менюк Сергей Григорьевич** – e-mail: [menuka@mail.ru](mailto:menuka@mail.ru); кафедра компьютерной инженерии и моделирования; к.э.н.; доцент.

**Менюк Дмитрий Сергеевич** – Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций; e-mail: [d.menuuk@mail.ru](mailto:d.menuuk@mail.ru); г. Москва, Россия; инженер.

**Dyadichev Valery Vladislavovich** – V.I. Vernadsky KFU; e-mail: [mr.dyadichev@mail.ru](mailto:mr.dyadichev@mail.ru); Simferopol, Russia; the Department of Computer Engineering and Modeling; dr. of eng. sc.; professor.

**Menyuk Sergey Grigor'evich** – e-mail: [menuka@mail.ru](mailto:menuka@mail.ru); the Department of Computer Engineering and Modeling; cand. of econom. sc.; associate professor.

**Menyuk Dmitry Sergeevich** – All-Russian Research Institute for the Operation of Nuclear Power Plants; e-mail: [d.menuuk@mail.ru](mailto:d.menuuk@mail.ru); Moscow, Russia; engineer.