

А. Н. Гершуни, Е. Н. Письменный, А. П. Нищик

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт
имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

Испарительно-конденсационные устройства для систем пассивного теплоотвода в атомной энергетике

Обоснованы преимущества испарительно-конденсационных устройств теплопередачи как перспективных средств пассивного теплоотвода и тепловой защиты в атомной энергетике. Рассмотрены основные теплофизические факторы, ограничивающие теплопередающую способность испарительно-конденсационных систем. Приведены результаты экспериментальных исследований теплотехнических характеристик длинномерных (8-метровых) вертикально ориентированных испарительно-конденсационных устройств (двухфазных термосифонов), которые показали достаточно высокую теплопередающую способность, устойчивость и надежность их работы в стационарных и пусковых режимах. Представлены примеры схемно-конструктивных решений испарительно-конденсационных систем пассивного теплоотвода и тепловой защиты применительно к объектам атомной энергетике.

Ключевые слова: системы пассивного теплоотвода; испарительно-конденсационные устройства; экспериментальные исследования; схемно-конструктивные решения.

О. Н. Гершуни, Е. М. Письменный, О. П. Нищик

Випаровувально-конденсаційні пристрої для систем пасивного тепловідведення в атомній енергетиці

Обґрунтовано переваги випаровувально-конденсаційних пристроїв теплопередачі як перспективних засобів пасивного тепловідведення і теплового захисту в атомній енергетиці. Розглянуто основні теплофізичні фактори, що обмежують теплопередавальну здатність випаровувально-конденсаційних систем. Наведено результати експериментальних досліджень теплотехнічних характеристик довгомірних (8-метрових) вертикально орієнтованих випаровувально-конденсаційних пристроїв (двофазних термосифонів), які показали достатньо високу теплопередавальну здатність, сталість і надійність їх роботи в стаціонарних і пускових режимах. Представлено приклади схемно-конструктивних рішень випаровувально-конденсаційних систем пасивного тепловідведення і теплового захисту стосовно об'єктів атомної енергетики.

Ключові слова: системи пасивного тепловідведення; випаровувально-конденсаційні пристрої; експериментальні дослідження; схемно-конструктивні рішення.

© А. Н. Гершуни, Е. Н. Письменный, А. П. Нищик, 2017

Обеспечение безопасности объектов атомной энергетики является необходимым базовым условием успешного устойчивого развития этой отрасли. После тяжелых аварий на АЭС («Три Майл Айленд», Чернобыльской, «Фукусима-1») традиционные подходы к обеспечению безопасности, основанные на высококвалифицированном уровне эксплуатации и применении активных автоматизированных средств защиты, дополняются приоритетной ориентацией на пассивные методы [1, 2]. Полностью пассивные системы обеспечения безопасности должны функционировать по природным физическим законам без вмешательства персонала, при отсутствии внешних источников энергии, движущихся механизмов, управляющих сигналов и независимо от степени работоспособности активных систем защиты.

Особое внимание уделяется созданию и внедрению пассивных систем теплопередачи, теплоотвода и тепловой защиты. Такие системы должны обеспечить усиление и повышение надежности барьеров безопасности работы ядерной энергетической установки, к которым, как известно, относятся тепловыделяющий элемент, система первого контура, система герметичных помещений или защитная оболочка [3, 4]. Актуально также применение пассивных систем теплоотвода в технологиях хранения отработанного ядерного топлива, сопровождающегося остаточным тепловыделением. Кроме того, возможно использование таких систем для обеспечения пассивной противопожарной тепловой защиты металлоконструкций и оборудования электростанции.

Анализ особенностей тепловых процессов и возможностей традиционных способов теплоотвода, охлаждения и тепловой защиты в ядерных энерготехнологиях показывает перспективность создания и внедрения систем теплопередачи на основе устройств испарительно-конденсационного типа (ИКТ), или иначе — испарительно-конденсационных систем (ИКС). В этих системах передача теплоты осуществляется за счет теплоты фазового перехода двухфазного промежуточного теплоносителя, небольшое количество которого циркулирует по замкнутому испарительно-конденсационному контуру. Такие системы могут быть конструктивно оформлены в виде отдельных или сгруппированных в пакет автономных герметичных теплопередающих устройств, работающих по принципу замкнутого испарительно-конденсационного цикла. Такие устройства называются *тепловыми трубами* (ТТ) при осуществлении в основном капиллярного транспорта жидкого теплоносителя или *двухфазными термосифонами* (ДТС) при осуществлении гравитационного течения жидкого теплоносителя [5–7]. Возможно также создание замкнутой ИКС в виде отдельно расположенных участков теплоотвода (испарения) и теплоотвода (конденсации), соединенных раздельными паропроводом и конденсаторопроводом.

Цель статьи — обоснование преимуществ испарительно-конденсационных устройств для систем пассивного теплоотвода в атомной энергетике, а также подтверждение этих преимуществ экспериментально полученными теплотехническими характеристиками длинномерных модельных образцов таких устройств и предложенными характерными схемно-конструктивными решениями указанных систем.

Преимущества ИКС теплопередачи. Перспективность разработки и адаптации систем теплопередачи ИКТ применительно к атомным энерготехнологиям основывается на следующих важных преимуществах таких систем:

обеспечении эффективного и надежного пространственного разделения источника и стока теплоты и,

при этом, высокой тепловой проводимости от зоны подвода к зоне отвода теплоты;

обеспечении в широких пределах трансформации теплового потока (его концентрации либо деконцентрации в зоне теплоподвода относительно зоны теплоотвода);

возможности эффективного развития внешней теплообменной поверхности в зонах подвода и отвода теплоты;

отсутствии расхода энергии на перемещение внутреннего теплоносителя.

По сути, такая система представляет собой высокоэффективный теплопровод с необходимой по площади эффективной поверхностью теплообмена от тепловыделяющего объекта к теплопоглощающей среде. Другими словами, такая система совмещает функции эффективного теплопровода (с эквивалентной теплопроводностью намного выше теплопроводности наиболее теплопроводных материалов) и эффективного радиатора с возможностью пассивного теплоотвода и при этом обладает относительно малыми габаритами и массой, высокой надежностью работы при различной ориентации в поле массовых сил.

Подчеркнем, что каждое теплопередающее устройство ИКТ (отдельно или в составе системы) представляет собой автономный герметичный циркуляционный контур и может обеспечить высокоэффективный пассивный теплоперенос из зоны с радиоактивной средой в чистую зону конечного поглощения теплоты и надежное разделение этих зон, а это позволяет предотвратить попадание радиоактивности в окружающую среду.

Теплофизические процессы в испарительно-конденсационном устройстве формируют его температурное поле. Важнейшей характеристикой температурного поля является перепад температуры по длине корпуса. Для оценки эффективности работы ИКС пользуются также величиной термического сопротивления — отношением перепада температуры по корпусу (разности средних температур корпуса в зонах испарения и конденсации) к передаваемому тепловому потоку Q . Между тепловым потоком и перепадом температуры по длине имеет место функциональная зависимость, сохраняющаяся до тех пор, пока тепловой поток Q не достигнет некоторого предельного значения $Q_{пр}$. При $Q > Q_{пр}$ перепад температуры резко увеличивается, и ИКС теряет свое главное достоинство — высокую теплопередающую способность. Поэтому область тепловых потоков $0 < Q < Q_{пр}$ является областью нормального функционирования ИКС.

Существует несколько факторов, ограничивающих нормальную работу различных типов ИКС. К основным из них относятся:

условия подвода и отвода теплоты и суммарное термическое сопротивление системы «источник теплоты — сток теплоты», которые определяют термодинамический предел теплопередающей способности;

потеря гидродинамической устойчивости поверхности раздела фаз при взаимодействии потоков пара и конденсата, которая определяет предел по взаимодействию, характерный, как правило, для ИКС без капиллярной структуры (для ДТС);

транспортные возможности капиллярной структуры по обеспечению циркуляции теплоносителя, которые определяют предел по капиллярному транспорту для ИКС с капиллярной структурой (для ТТ).

Указанные ограничения имеют различную физическую природу, но их превышение приводит к резкому увеличению температуры корпуса в зоне испарения,

соответствующему увеличению перепада температуры по длине ИКС и в результате — к прекращению ее нормального функционирования.

Таким образом, основными теплотехническими характеристиками ИКС являются термическое сопротивление в области нормального функционирования и предельная, или максимальная, теплопередающая способность.

При выполнении расчетов ИКС обычно задаются выделяемый объектом и передаваемый системой тепловой поток, допустимая температура тепловыделяющего объекта, условия теплообмена с тепловыделяющим объектом и средой — поглотителем теплоты, конструктивные параметры тепловыделяющего объекта, ограничения конструктивных параметров системы. Методика расчетов должна базироваться на закономерностях процессов тепломассообмена, гидродинамики в ИКС, а также на результатах оптимизации конструктивных характеристик. Исследованиям характерных теплофизических процессов в ИКС посвящены многие работы, в том числе [5, 7], а в статьях [8, 9] представлены некоторые результаты исследований и разработок, выполненных с учетом особенностей и специфики рассматриваемой тематики.

Поиск и изучение информации о системах теплоотвода и тепловой защиты ИКТ применительно к ядерным энерготехнологиям выявляют относительно небольшое количество таких публикаций [8—15]. Большая их часть посвящена разработке схемно-конструктивных решений ИКС и их расчетному моделированию. Вместе с тем, актуальны экспериментальные исследования теплотехнических характеристик модельных образцов теплопередающих элементов ИКТ применительно к рассматриваемой тематике. Далее представлены некоторые из исследований авторов, результаты которых являются необходимой дополнительной информацией для разработки натуральных систем теплоотвода и тепловой защиты.

Экспериментальное исследование длинномерных теплопроводов ИКТ. Учитывая длинномерность рассматриваемых систем теплопередачи, сложность и трудоемкость проведения их исследований в натуральных условиях, целесообразно получить научную информацию путем создания единичных модельных образцов длинномерных теплопроводов ИКТ и проведения экспериментальных исследований их теплотехнических характеристик в условиях имитации реального тепловыделения методом электронного нагрева с обеспечением при этом основных требований к теплотехническим характеристикам теплопроводов.

Объектами исследований являются вертикально ориентированные ДТС четырех вариантов конструктивного исполнения:

- 1) прямой ДТС, зона конденсации имеет поперечное спирально-накатное оребрение, охлаждение за счет свободной конвекции воздуха (рис. 1);
- 2) прямой ДТС, оребрение в зоне конденсации отсутствует, водяное охлаждение (рис. 2);
- 3) вариант, аналогичный варианту 2, но с более длинной зоной конденсации (рис. 2);
- 4) зона конденсации ДТС наклонена (изгиб в зоне транспорта), оребрение в зоне конденсации отсутствует, водяное охлаждение (рис. 2).

Геометрические и конструктивные параметры ДТС: наружный диаметр несущей трубы $d = 25$ мм; внутренний диаметр несущей трубы $d_{вн} = 20,5$ мм; наружный диаметр оребрения $d_p = 53$ мм; шаг оребрения $S_p = 3$ мм; рабочая длина ДТС $L = 8$ м; длины зон указаны на рис. 1, 2.

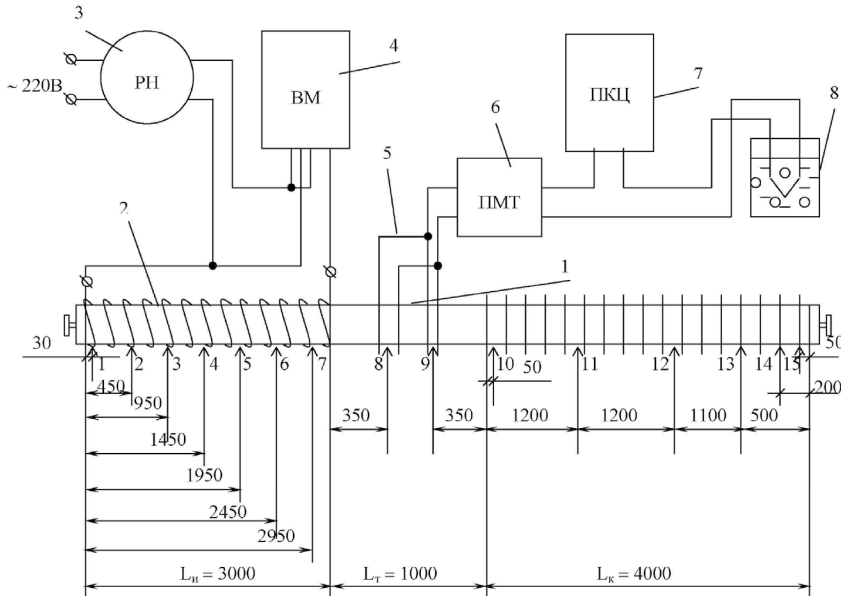
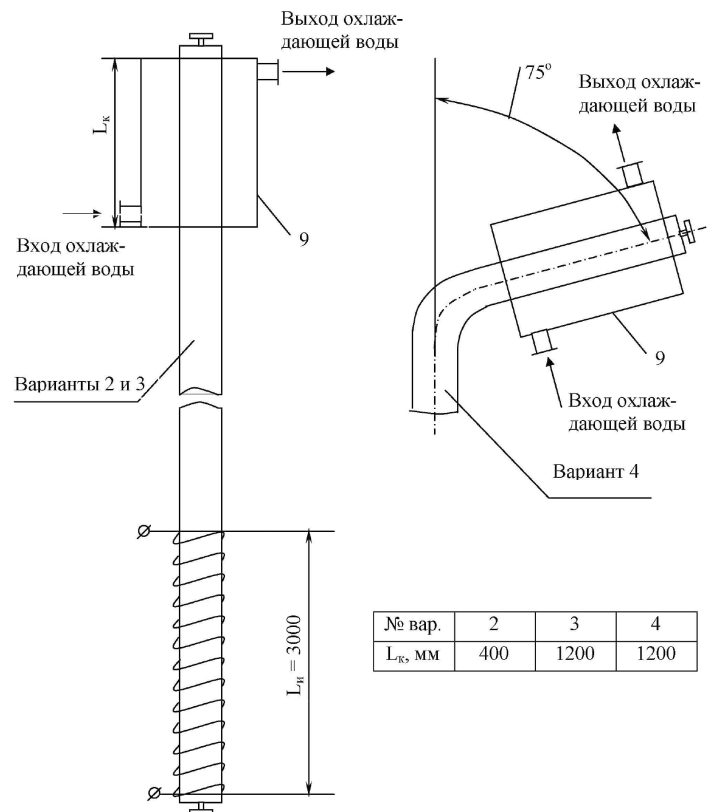


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Материал несущей цельнотянутой трубы — сталь 10. Оребрение выполнено из алюминиевого сплава АД-1. Теплоноситель приготовлен на основе дистиллированной воды с антикоррозионной и антифризной добавками.

Экспериментальная установка (см. рис. 1, 2) включает исследуемый ДТС, систему подвода тепловой нагрузки, систему охлаждения и систему измерений. Подвод теплоты к ДТС 1 осуществлялся омическим нагревателем 2 из нихромовой проволоки, навитой на защищенную тонким слоем изоляции поверхность зоны испарения. Подводимый тепловой поток изменялся с помощью регулятора напряжения (РН) 3, подключенного к однофазной сети 220 В, 50 Гц, а измерения проводились с помощью ваттметра (ВМ) 4. Система измерения температур состояла из датчиков температуры — медь-константановых термопар 5, переключателя (ПМТ) 6 и цифрового прибора (ПКЦ) 7. Холодные спаи термопар помещались в сосуд 8 с талым льдом. Термопары зачеканивались в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, в продольных пазах, выфрезерованных на внешней поверхности корпуса ДТС в зонах испарения и транспорта, а также устанавливались на ребрах в зоне конденсации. Температура окружающего воздуха и охлаждающей воды измерялась термометром.

Испытания ДТС проводились при его вертикальной ориентации (зона конденсации выше зоны испарения). Теплосброс осуществлялся либо за счет свободной конвекции к окружающему воздуху с температурой $21 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ (вариант 1), либо за счет вынужденной конвекции в проточном теплообменнике 9 к воде с температурой на входе $17 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ (варианты 2, 3, 4). Исследования проводились при объемах заполнения теплоносителем $V_3 = 150; 290; 450; 590; 730$ мл, которые составляют, соответственно, следующие уровни заполнения по высоте ДТС от нижнего торца (дна) внутренней полости: $L_3 = 455; 880; 1360; 1790; 2210$ мм и, соответственно, следующие значения степени заполнения зоны испарения: $\epsilon_{и} = 0,15; 0,3; 0,45; 0,6; 0,74$. Внешняя поверхность омического нагревателя и транспортная зона ДТС теплоизолировались от окружающей среды. Тепловой поток к ДТС подводился при его ступенчатом увеличении. На каждом уровне теплового потока



№ вар.	2	3	4
L_k , мм	400	1200	1200

Рис. 2. Экспериментальный ДТС (варианты 2—4)

после достижения стационарного состояния измерялись тепловой поток и температура корпуса, ребер и охлаждающей среды. Также определялись пусковые характеристики ДТС в процессе его выхода на стационарный режим.

Достижение предельной теплопередающей способности ДТС, которая характеризуется предельным тепловым потоком $Q_{пр}$, может фиксироваться по резкому возрастанию температуры корпуса в зоне испарения ДТС. Отметим, что

в условиях теплоподвода методом электронагрева ограничение нормального функционирования ДТС вызвано внутренними теплофизическими процессами, которыми, как правило, являются процессы взаимодействия потоков паровой и жидкой фаз.

Анализ результатов исследований ДТС варианта 1 показывает, что при вертикальной ориентации в условиях отвода теплоты от радиатора за счет свободной воздушной конвекции значения среднего конвективного коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_o$ находятся в диапазоне 1,9...3,1 Вт/(м²·К) при изменении теплового потока от 400 Вт до 2200 Вт. Средняя температура поверхности ребер радиатора $\bar{t}_p = 56,8...166,1$ °С, а перепад температуры по длине ДТС $\Delta t = 1,8...10,3$ К при изменении теплового потока в указанном диапазоне. Значения коэффициентов теплоотдачи в зоне испарения $\bar{\alpha}_{ин}$ достигают 6900 Вт/(м²·К), а расчетные значения скоростей пара $w_{п}$ не превышают 4,5 м/с. При разных степенях заполнения наблюдалась изотермичность поверхности корпуса в зоне испарения и в целом устойчивая надежная работа ДТС варианта 1 в указанном диапазоне режимных параметров.

Переход к конструктивному варианту 2 был осуществлен с целью достижения максимальной теплопередающей способности ДТС в условиях более низких рабочих температур и более высоких скоростей пара. В этих исследованиях при тепловом потоке $Q = 2400$ Вт, переданном ДТС со степенью заполнения $\varepsilon_{ин} = 0,15$ при его вертикальной ориентации, температуре $t_o = 19 \pm 1$ °С и расходе охлаждающей воды $V_o = 5$ л/мин, плотность теплового потока и средний коэффициент теплоотдачи в зоне испарения составили $q_{ин} = 1,24 \cdot 10^4$ Вт/м² и $\bar{\alpha}_{ин} = 3553$ Вт/(м²·К); средняя температура поверхности корпуса в зоне транспорта, практически равная температуре насыщения, $\bar{t}_т = t_{нас} = 81,6$ °С; расчетная скорость пара $w_{п} = 10,1$ м/с. Увеличение расхода воды до $V_o = 7,5$ л/мин приводит к снижению температуры насыщения до 64,7 °С, уменьшению среднего коэффициента теплоотдачи в зоне испарения (примерно на 20 %) и к возрастанию скорости пара $w_{п}$ до 20 м/с. Анализ результатов исследований ДТС при различном заполнении теплоносителем показывает, что неизотермичность поверхности корпуса в зоне испарения не выше 5 К при $w_{п} \leq 10$ м/с и не выше 20 К при более высоких скоростях пара. Во всем диапазоне исследованных режимных параметров ($Q = 0...2400$ Вт; $t_{нас} = 40...82$ °С; $w_{п} \leq 23$ м/с) при степенях заполнения $\varepsilon_{ин} \leq 0,5$ ДТС работал в устойчивом режиме. При больших степенях заполнения и расчетных скоростях пара $w_{п} \geq 10$ м/с наблюдалась некоторая неустойчивость с изменением температуры поверхности в зоне испарения в интервале, как правило, 10...20 К при фиксированных значениях режимных параметров (Q, t_o, V_o).

В проведенных экспериментах ограничение теплопередающей способности не было достигнуто. Как показывают расчеты, предельные тепловые потоки по взаимодействию фаз значительно выше экспериментальных значений переданных Q в указанном диапазоне режимных и конструктивных параметров.

С целью создания условий для достижения предельных тепловых потоков был осуществлен переход к конструктивным вариантам 3 и 4 с модернизацией схемы электронагрева и проведены соответствующие исследования. При тех же условиях водяного охлаждения (t_o, V_o), но уже при значительно меньшем уровне термических сопротивлений в зоне теплоотвода, ДТС работал на более низком температурном уровне и, соответственно, при более

низких плотностях и более высоких скоростях пара. В области нормального функционирования на всех уровнях передаваемых тепловых потоков наблюдалась устойчивая надежная работа ДТС со степенью изотермичности в зоне испарения, аналогичной конструктивному варианту 2.

Результаты исследований ДТС конструктивного варианта 4 при $\varepsilon_{ин} = 0,3, t_o = 14...15$ °С, $V_o = 7,5$ л/мин приведены в табл. 1. Для диапазона тепловых потоков ($Q = 2000...8000$ Вт), указанного в табл. 1, давление в ДТС (давление насыщения) изменяется в диапазоне 0,08...1,07 бар соответственно.

Таблица 1. Результаты экспериментов (вариант 4; $\varepsilon_{ин} = 0,3$)

Определяемые величины	Q, Вт						
	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
$t_1, \text{°C}$	62,0	70,8	78,2	88,0	98,0	109,5	136,0
$t_2, \text{°C}$	48,0	60,0	71,8	80,7	94,0	105,1	109,5
$t_3, \text{°C}$	49,5	62,0	74,0	81,9	95,3	109,5	113,5
$t_4, \text{°C}$	45,2	60,0	71,2	79,8	90,3	111,6	150,0
$t_5, \text{°C}$	45,7	59,5	69,7	78,7	91,2	103,0	107,5
$t_6, \text{°C}$	49,6	62,0	72,6	81,0	93,3	107,1	120,9
$t_7, \text{°C}$	46,5	59,0	70,0	79,0	91,0	104,0	107,5
$t_8, \text{°C}$	41,8	55,3	66,4	73,8	85,6	98,2	101,4
$t_9, \text{°C}$	42,2	55,3	66,4	74,0	85,6	97,8	101,4
$\bar{t}_{ин}, \text{°C}$	49,5	61,9	72,5	81,3	93,3	107,1	120,7
$\bar{t}_т, \text{°C}$	42,0	55,3	66,4	73,9	85,6	98,0	101,4
$q_{ин}, \text{Вт/м}^2$	10363	15544	20726	25907	31089	36270	41452
$\bar{\alpha}_{ин}, \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$	1382	2355	3398	3501	4037	3985	2148
$w_{п}, \text{м/с}$	45,1	38,4	30,1	28,3	21,4	16,7	17,1

В экспериментах получен предельный переданный ДТС тепловой поток $Q_{пр}$, примерно равный 7 кВт (при $Q = 8$ кВт установившийся режим не был достигнут из-за непрерывного увеличения температуры t_1). При $Q = 7$ кВт плотность теплового потока и средний коэффициент теплоотдачи в зоне испарения составляли $q_{ин} = 3,6 \cdot 10^4$ Вт/м² и $\bar{\alpha}_{ин} = 3985$ Вт/(м²·К), средняя температура поверхности корпуса в зоне испарения $\bar{t}_{ин} = 107,1$ °С, средняя температура поверхности корпуса в зоне транспорта, практически равная температуре насыщения, $\bar{t}_т = 98$ °С, давление в ДТС (давление насыщения) — 0,94 бар, расчетная скорость пара $w_{п} = 16,7$ м/с, неизотермичность поверхности в зоне испарения не превышает 8 К.

Предельный тепловой поток по условию взаимодействия фаз зависит от геометрических параметров ДТС (диаметра $d_{ин}$ и длины зоны испарения), вида теплоносителя и его теплофизических свойств, определяемых давлением или температурой насыщения, и практически не зависит от степени заполнения в исследованном диапазоне $\varepsilon_{ин}$. Расчеты, выполненные на основе разработанных моделей предельного теплопереноса по взаимодействию фаз [7], показывают, что для исследуемого ДТС при $t_{нас} = 98$ °С расчетное значение предельного теплового потока удовлетворительно согласуется с экспериментальным.

На основе полученных результатов проведена оценка максимальной теплопередающей способности ДТС как теплопередающих элементов систем теплоотвода и тепловой

защиты. Например, при $L_{и} = 3$ м и $t_{нас} = 200$ °С расчетные значения $Q_{пр}$ для ДТС с разными диаметрами корпуса и предельные значения аксиальной плотности передаваемого теплового потока q_s по отношению к площади поперечного сечения корпуса ДТС по наружному диаметру таковы:

d , мм	25	32	38	51
$d_{вн}$, мм	20,5	26	32	45
$Q_{пр}$, кВт	13,8	22,1	33,5	65,9
q_s , кВт/см ²	2,8	2,8	3,0	3,2

Для большинства рассматриваемых объектов возможного применения ИКС теплопередачи характерны граничные условия третьего рода на внешних поверхностях зон теплоподвода и теплоотвода. Эти условия и термическое сопротивление системы «источник теплоты — сток теплоты» определяют величину передаваемого теплового потока (термодинамическое ограничение), а также способы ее повышения. Поэтому при расчетах ИКС необходимо обеспечить выполнение следующего условия: передаваемый тепловой поток, определяемый термодинамическим ограничением, не должен превышать предельный передаваемый тепловой поток, вызванный внутренними теплофизическими процессами в ИКС и в частности процессами взаимодействия в ДТС.

Исследования пусковых характеристик ДТС всех конструктивных вариантов при резком набросе тепловой мощности ($Q = 2000$ Вт) выявили следующие общие закономерности. В начальный период (как правило, до 2–3 мин) в динамике пуска наблюдалось повышение температуры поверхности в зоне испарения до некоторой величины с последующим ее резким снижением и дальнейшим выходом ДТС на стационарный режим работы. Анализируя полученные характеристики, можно назвать две причины начального всплеска температур в зоне испарения. Первая связана с начальным выбросом теплоносителя в зону конденсации и соответствующим блокированием части ее поверхности из-за большой скорости пара при начальных температурах пуска. Вследствие этого значительно увеличивается термическое сопротивление в зоне конденсации и повышается температура поверхности в зоне испарения. Вторая причина связана с начальной работой ДТС в наименее интенсивном режиме испарения при очень малых давлениях, что приводит к дополнительному перегреву поверхности корпуса. С возрастанием температуры насыщения скорость и динамический напор пара уменьшаются. При некотором уровне температуры силовое взаимодействие фаз приводит к тому, что жидкостная пробка возвращается в зону испарения. Это вызывает снижение термического сопротивления в зоне конденсации. Кроме того, наступает более интенсивный режим теплообмена в зоне испарения — режим кипения. Поэтому в характеристиках пуска после всплеска наблюдается падение температуры поверхности зоны испарения и дальнейшее протекание пускового режима в соответствии с известными закономерностями. Отметим, что для заданных конструктивных и режимных параметров ДТС температурно-временные характеристики температурного всплеска определяются в основном условиями теплоотвода и в меньшей мере — объемом заполнения теплоносителем.

Результаты исследований длинномерных ДТС свидетельствуют о соответствии их теплопередающей способности уровню тепловых нагрузок для систем теплоотвода и тепловой защиты, которые могут быть созданы на базе

подобных теплопередающих элементов. Проведенные исследования расширяют научно-экспериментальную базу для проектирования и изготовления пассивных систем теплопередачи, теплоотвода и тепловой защиты. Рассмотрим отдельные примеры принципиальных схемно-конструктивных решений таких систем.

Примеры схемно-конструктивных решений. Одно из решений направлено на усиление барьеров безопасности, а именно на повышение надежности устройства локализации расплава активной зоны (АЗ) при тяжелых авариях. Впервые подобное устройство было реализовано в проектах Тяньваньской АЭС в Китае, АЭС «Куданкулам» в Индии и представляло собой установленную в подреакторном пространстве ловушку тигельного типа, которая включала охлаждаемый металлический корпус, частично заполненный жертвенным материалом [16]. Наружная поверхность ловушки охлаждалась водой, которая поступала в кольцевой секционный теплообменник, охватывающий корпус ловушки, либо в зазор между корпусом ловушки и стеной шахты реактора. К недостаткам такого способа охлаждения относятся опасность парового взрыва при возможном попадании расплава в воду, а также отвод образующегося пара в защитную оболочку (ЗО), что может привести к ее разрушению в случае превышения давления в ней выше допустимого.

Указанные недостатки могут быть устранены за счет использования ИКС для охлаждения поверхности корпуса ловушки. Вместо кольцевого секционного теплообменника или воды в зазоре корпус ловушки оснащается снаружи пакетом теплопередающих элементов ИКТ, которыми могут быть ТТ или ДТС (рис. 3). Испарительные участки этих теплопередающих элементов контактируют с тепловыделяющей поверхностью, транспортные участки герметично проходят через бетон шахты реактора, а конденсационные участки размещаются в ЗО либо вне ее в промежуточном или конечном поглотителе теплоты.

Данное техническое решение обеспечит повышение надежности удержания расплава АЗ в ловушке благодаря способности ИКС отводить большие тепловые потоки при поддержании безопасного температурного режима корпуса ловушки, что позволит сохранить его целостность вплоть до кристаллизации расплава. При этом для обеспечения надежной работы ИКС в области ее нормального функционирования могут быть предусмотрены дополнительные термические сопротивления (например, в виде высокотемпературных покрытий корпуса ловушки), которые увеличивают до необходимого уровня общее термическое сопротивление теплопередачи от расплава к участкам испарения ИКС. Наличие двух барьеров в каждом теплопередающем элементе ИКТ (стенки корпуса на участках испарения и конденсации) обеспечивает дополнительную защиту от возможного радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Следующий пример применения ИКС связан с повышением безопасности хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ) в сухих хранилищах камерного типа в условиях остаточного тепловыделения. Существующие технологии камерного хранения различаются по признаку применения пеналов перед загрузкой ОЯТ в камеры. Технология сухого камерного хранения, которая предусматривает размещение отработанных топливных сборок непосредственно в гнездах бетонной камеры, реализована, например, на АЭС «Пакш» (Венгрия). По другой технологии отработанные топливные сборки помещаются в герметичные пеналы, которые устанавливаются в гнездах

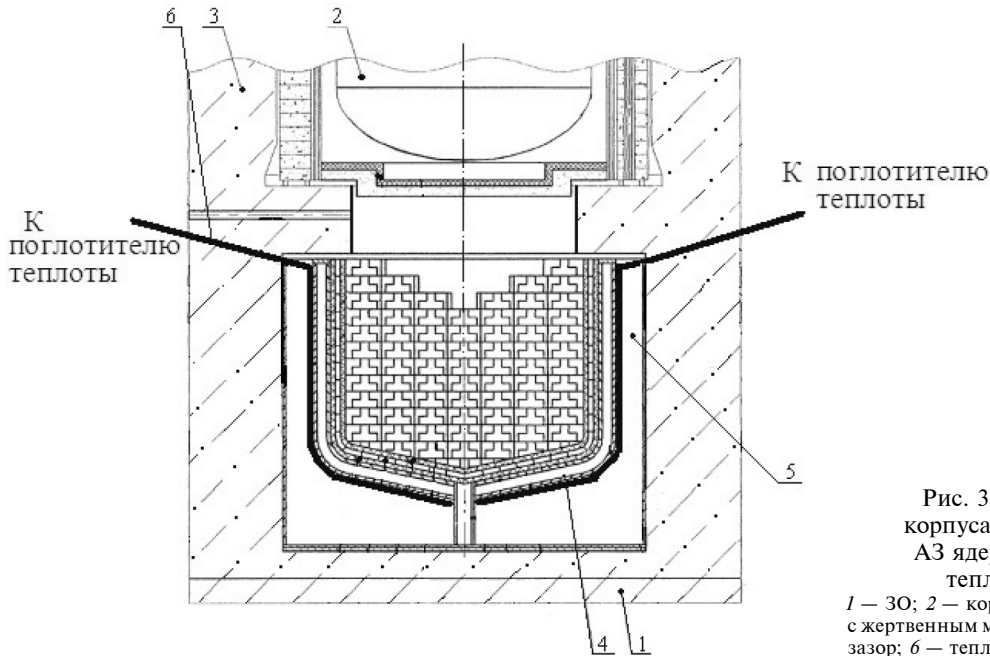


Рис. 3. Пассивная система охлаждения корпуса устройства локализации расплава АЗ ядерного реактора с использованием теплопередающих элементов ИКТ:
1 — ЗО; 2 — корпус реактора; 3 — шахта; 4 — корпус ловушки с жертвенным материалом и защитными слоями; 5 — кольцевой зазор; 6 — теплопередающие элементы ИКТ

хранения. Герметичные пеналы в конструкции модуля хранилища ХОТ-2 (Россия) [17], выполненного по подобной технологии, омываются и охлаждаются непосредственно атмосферным воздухом. Предусмотренные барьеры безопасности в этом хранилище не исключают возможность попадания продуктов распада за пределы оболочки биологической защиты вследствие прямого контакта атмосферного воздуха с пеналами и возможной их деградации в течение длительного срока хранения.

В предлагаемом решении (рис. 4) предусмотрен дополнительный барьер безопасности [18]. Такой барьер безопасности создается в результате выполнения камеры хранения ОЯТ герметичной. В верхней стене хранилища устанавливается пакет теплопередающих элементов ИКТ, испарительные участки которых расположены в камере хранения, транспортные участки герметично проходят через стену, а конденсационные участки находятся в чистой зоне вне хранилища и омываются атмосферным воздухом. В герметичной камере хранения осуществляется естественная циркуляция промежуточного газового теплоносителя (например, воздуха), который воспринимает тепловой поток от тепловыделяющих пеналов и отдает его ИКС. Эффективная пассивная теплопередача от ОЯТ, находящегося в герметичной камере, к чистому атмосферному воздуху обусловлена высокой теплопередающей способностью и низким термическим сопротивлением ИКС, а также возможностью эффективного развития внешней поверхности теплообмена ИКС с промежуточным газовым теплоносителем и атмосферным воздухом. Данное решение ярко иллюстрирует рассмотренные ранее преимущества ИКС теплопередачи.

Третье решение направлено на повышение предела огнестойкости несущих металлоконструкций зданий АЭС в условиях пожара. Важными задачами при ликвидации пожара являются его локализация и применение пассивных средств защиты, которые должны обеспечить требуемую огнестойкость конструкций и оборудования независимо от действия активных систем пожаротушения. К существующим пассивным средствам огневой и тепловой защиты несущих металлоконструкций здания относятся бетонирование, облицовка кирпичом, плитами, штукатурка,

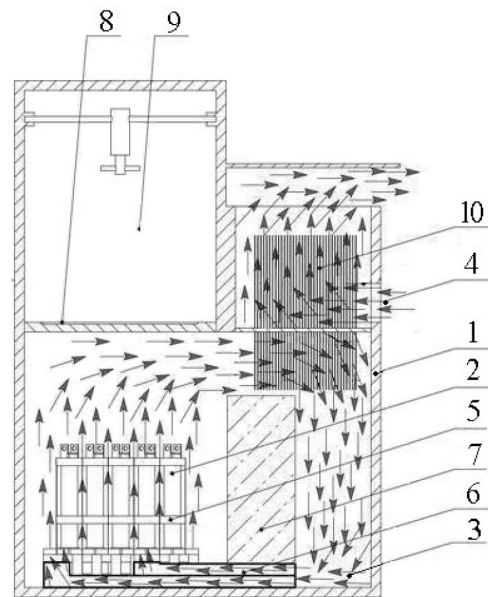


Рис. 4. Пассивная ИКС охлаждения ОЯТ в модуле хранилища камерного типа:
1 — корпус; 2 — пенал с ОЯТ;
3 — поток промежуточного газового теплоносителя;
4 — поток атмосферного воздуха;
5 — решетка для размещения пеналов;
6 — система ходов естественной циркуляции газового теплоносителя; 7 — перегородка;
8 — люк для перегрузочных операций;
9 — зал перегрузочных операций;
10 — теплопередающие элементы ИКТ

облегченные неорганические покрытия, покрытия терморасширяющегося типа и др. Их назначение — не допустить в течение регламентируемого отрезка времени такого перегрева металла, который может вызвать потерю несущей способности или целостности конструкции.

Целью предлагаемого решения является повышение степени тепловой защиты путем придания несущим элементам металлоконструкций способности эффективного

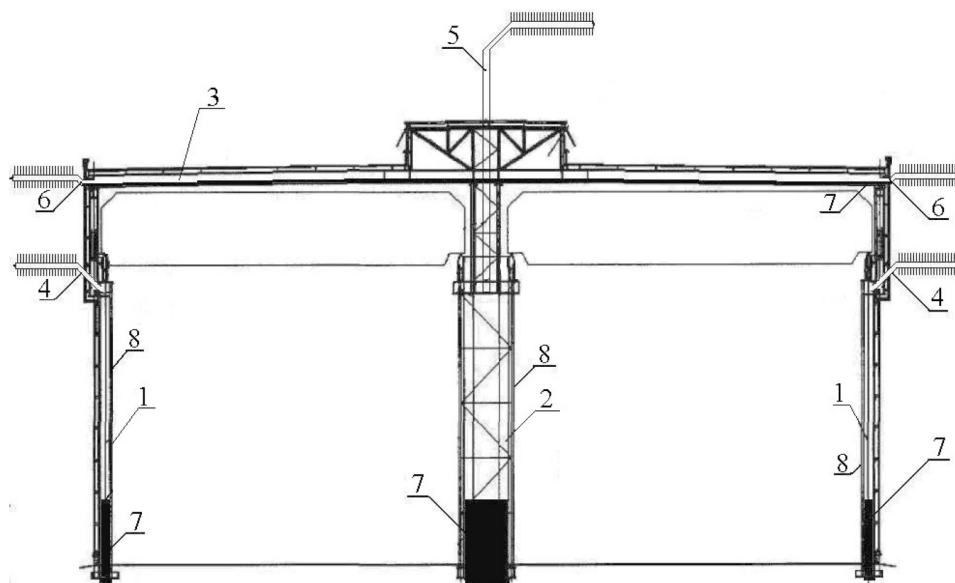


Рис. 5. Огнестойкий каркас здания:
1 — крайние колонны; 2 — центральная колонна; 3 — ригель; 4, 5, 6 — трубчатые отводы; 7 — теплоноситель ДТС; 8 — огнезащитное покрытие

пассивного отвода избыточных тепловых потоков в окружающую среду вне зоны пожара. Для этого элементы металлоконструкций должны быть выполнены в виде теплопередающих элементов ИКТ (например, ДТС). Данное решение иллюстрирует рис. 5, на котором схематично представлено поперечное сечение огнестойкого каркаса здания (например, машинного зала АЭС) [19]. Колонны, ригели и другие несущие элементы, которые при таком решении имеют трубчатый профиль, покрыты огнезащитным материалом (толщиной до 10 мм) и выполняют функцию испарительных участков ДТС, в верхней части дополнены трубчатыми отводами, выполняющими функции транспортных и конденсационных участков ДТС. При этом для повышения эффективности пассивного теплоотвода в окружающий воздух конденсационные участки снаружи имеют развитую теплообменную поверхность (например, в виде оребрения).

При проектировании и практической реализации рассмотренных либо иных ИКС теплоотвода необходимо обеспечить герметичность в местах проходов корпусов труб испарительно-конденсационных устройств через разделяющие стенки конструкции барьера безопасности, а также минимизировать количество таких гермопроходов.

Приведенные примеры предлагаемых схемно-конструктивных решений иллюстрируют сформулированные достоинства и преимущества испарительно-конденсационных устройств и показывают перспективность создания на их основе автономных, надежных и эффективных систем пассивного теплоотвода в атомной энергетике.

Выводы

1. Обоснованы преимущества испарительно-конденсационных устройств теплопередачи как перспективных средств пассивного теплоотвода и тепловой защиты в атомной энергетике. Такие устройства с относительно малыми габаритами и массой совмещают функции эффективного теплопровода и эффективного радиатора, могут обеспечить высокоэффективный пассивный теплоперенос из зоны с радиоактивной средой в чистую зону конечного поглощения теплоты и надежное разделение этих зон.

2. Результаты выполненных экспериментальных исследований свидетельствуют о высокой теплопередающей способности, устойчивой и надежной работе длиномерных ДТС. Для 8-метрового стального ДТС с водой в качестве теплоносителя, с наружным диаметром корпуса 25 мм, длинами зон испарения и конденсации 3 м и 1,2 м на уровне рабочей температуры 100 °С получены предельный тепловой поток по взаимодействию фаз, примерно равный 7 кВт, соответствующая предельная аксиальная плотность теплового потока по отношению к площади поперечного сечения корпуса по наружному диаметру 1,4 кВт/см², неизотермичность поверхности в зоне испарения не выше 8 К.

3. Экспериментальные исследования пусковых характеристик ДТС при резком набросе теплового потока выявили в начальный период (как правило, до 2–3 мин) повышение температуры поверхности в зоне испарения и последующее ее снижение. Затем наблюдается монотонное повышение температуры с выходом на стационарный режим работы. Отмеченные особенности динамики пуска вызваны проанализированными изменениями термических сопротивлений в зонах испарения и конденсации ДТС в начальный период пуска и не снижают надежность работы ДТС.

4. Приведенные примеры схемно-конструктивных решений показывают возможность создания эффективных пассивных систем теплоотвода и тепловой защиты ИКТ для повышения безопасности объектов атомной энергетики.

Список использованной литературы

1. Громов Г. В., Дыбач А. М., Зеленый О. В., Инюшев В. В., Носовский А. В., Шоломицкий С. Э., Гашев М. Х., Миколайчук Е. А. О критериях и требованиях безопасности к новым энергоблокам АЭС в свете уроков аварии на АЭС «Фукусима-Даичи». *Ядерна та радіаційна безпека*. К., 2013. Вип. 1(57). С. 7–9.
2. Yu Yu, Wang Shengfei, Niu Fenglei. Effect of Air Temperature on Failure Prognosis of Passive Containment Cooling System in AP1000. *Chemical Engineering Transactions*. 2013. V. 33. P. 835–840.
3. Wang, Xianmao; Chang, Huajian; Corradini, Michael; Cong, Tenglong. Prediction of falling film evaporation on the AP1000 passive containment cooling system using ANSYS FLUENT code. *Annals of Nuclear Energy*. 2016. V. 95. № 9. P. 168–175.

4. Sang Ho Kim, Soon Heung Chang, Yu Jung Choi, Yong Hoon Jeong. A passive decay heat removal strategy of the integrated passive safety system (IPSS) for SBO combined with LOCA. *Nuclear Engineering and Design*. 2015. V. 295. № 12. P. 346–359.
5. Семена М. Г., Гершуни А. Н., Зарипов В. К. Тепловые трубы с металловолоконными капиллярными структурами. К. : Вища шк., 1984. 216 с.
6. Zohuri, B. (2016), *Heat Pipe Design and Technology*. Second Edition, Springer, Switzerland, 513 p.
7. Безродный М. К., Пиоро И. Л., Костюк Т. О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. К. : Факт, 2003. 480 с.
8. Гершуни А. Н., Нищик А. П., Письменный Е. Н. Особенности тепловых расчетов систем поверхностного охлаждения и тепловой защиты испарительно-конденсационного типа. *Промышленная теплотехника*. 2007. Т. 29, № 3. С. 60–66.
9. Гершуни А. Н., Нищик А. П. Исследование моделей систем поверхностного охлаждения и тепловой защиты испарительно-конденсационного типа. *Промышленная теплотехника*. 2008. Т. 30, № 2. С. 64–70.
10. Письменный Е. Н., Гершуни А. Н., Нищик А. П. Состояние и развитие систем охлаждения отработанного ядерного топлива. *Промышленная теплотехника*. 2000. Т. 22, № 5-6. С. 41–46.
11. Письменный Е. Н., Гершуни А. Н., Нищик А. П. Состояние и развитие систем расхолаживания и тепловой защиты атомного энергетического оборудования. *Промышленная теплотехника*. 2003. Т. 25, № 2. С. 52–57.
12. Домашев Е. Д., Свириденко И. И. Развитие пассивных средств аварийного расхолаживания ядерных реакторов. *Промышленная теплотехника*. 2005. Т. 27, № 1. С. 61–72.
13. Свириденко И. И., Тимофеев В. А., Шевелев Д. В. Исследование характеристик пассивной тепловой защиты конечного поглотителя СПОТ реакторной установки с ВВЭР-1000. *Вісник СевДТУ*. 2009. Вип. 97. С. 69–74.
14. Наффаа Х. М., Герлига В. А., Шевелев Д. В., Балашевский А. С. Оценка эффективности системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки РУ с ВВЭР в условиях длительного обесточивания. *Ядерна та радіаційна безпека*. К., 2013. Вип. 2(58). С. 27–31.
15. Наффаа Х. М., Дубковский В. А. Обоснование выбора схемного решения и геометрических параметров СПОТ ГО ВВЭР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*. К., 2014. Вип. 3(63). С. 19–23.
16. Хабенский В. Б., Грановский В. С., Бешта С. В., Витоль С. А., Сулацкий А. А., Крушинов Е. В. Функционирование теплозащитных экранов устройства локализации расплава АЭС с ВВЭР. *Теплоэнергетика*. 2011. № 4. С. 37–42.
17. Калинин В. И., Крицкий В. Г., Размашкин Н. В., Токаренко А. И., Спичев В. В., Шафрова Н. П., Эркенов К. М., Давиденко Н. Н., Беспалов В. Н. Технологический процесс переноса ОЯТ РБМК-1000 с “мокрого” на “сухое” хранение. С.-Пб. : ООО «Типография “Береста”», 2010. 108 с.
18. Патент на корисну модель № 85484, Україна. МПК G21C 13/00. Модуль сухого сховища відпрацьованого ядерного палива, 2013, бюл. 22.
19. Патент на корисну модель № 70068, Україна. МПК E04B 1/94. Вогнестійкий каркас будівлі, 2012, бюл. № 10.
- grated Passive Safety System (IPSS) for SBO Combined with LOCA”, *Nuclear Engineering and Design*, V. 295, No. 12, pp. 346–359.
5. Semena, M. G., Gershuni, A. N., Zaripov, V. K. (1984), “Thermal Pipes with Metal Fiber Capillary Structures” [Teplovyie truby s metallvoloknistymi kapillarnymi strukturami], Kyiv, Vyshcha Shkola, 1984, 216 p. (Rus)
6. Zohuri, B. (2016), “Heat Pipe Design and Technology. Second Edition”, Springer, Switzerland, 513 p.
7. Bezrodnyi, M. K., Pioro, I. L., Kostiyuk, T. O. (2003), “Processes of Transfer in Two-Phase Thermosiphon Systems” [Protsessy perenosu v dvukhfaznykh termosifonnykh sistemakh], Kyiv, Fakt, 480 p. (Rus)
8. Gershuni, A. N., Nishchik, A. P., Pismennyi, E. N. (2007), “Peculiarities of Thermal Calculations of Surface Cooling and Thermal Protection Systems of Evaporation and Condensation Type” [Osobennosti teplovykh raschiotov system poverkhnostnogo okhlazhdeniia i teplovoi zashchity isparitelno-kondensatsionnogo tipa], *Industrial Thermal Technologies*, V. 29, No. 3, pp. 60–66. (Rus)
9. Gershuni, A. N., Nischik, A. P. (2008), “Research of Models of Surface Cooling and Thermal Protection Systems of Evaporation and Condensation Type” [Issledovaniie modelei system poverkhnostnogo okhlazhdeniia i teplovoe zashchity isparitelno-kondensatsionnogo tipa], *Industrial Thermal Technologies*, V. 30, No. 2, pp. 64–70. (Rus)
10. Pismennyi, E. N., Gershuni, A. N., Nishchik, A. P. (2000), “State and Development of Spent Nuclear Fuel Cooling Systems” [Sostoianii i razvitiie system okhlazhdeniia otrabotannogo yadernogo topiva], *Industrial Thermal Technologies*, V. 22, No. 5-6, pp. 41–46. (Rus)
11. Pismennyi, E. N., Gershuni, A. N., Nishchik, A. P. (2003), “State and Development of Systems for Cooldown and Thermal Protection of Nuclear Power Equipment” [Sostoianii i razvitiie sistem rashkolazhivaniia i teplovoi zashchity atomnogo energeticheskogo oborudovaniia], *Industrial Thermal Technologies*, V. 25, No. 2, pp. 52–57. (Rus)
12. Domashev, E. D., Sviridenko, I. I. (2005), “Development of Passive Systems for Emergency Cooldown of Nuclear Reactors” [Razvitiie passivnykh sredstv avariinogo rashkolazhivaniia yadernykh reaktorov], *Industrial Thermal Technologies*, V. 27, No. 1, pp. 61–72. (Rus)
13. Sviridenko, I. I., Timofeev, V. A., Shevelev, D. V. (2009), “Research Characteristics of Passive Thermal Protection of Ultimate Heat Sink of VVER-1000” [Issledovaniie kharakteristik passivnoi teplovoi zashchity konechnogo poglotitel'ia SPOU reaktornoi ustanovki s VVER-1000], *Journal of the Sevastopol State University*, Ed. 97, pp. 69–74. (Rus)
14. Naffaa, Kh. M., Gerliga, V. A., Shevelev, D. V., Balashevskii, A. S. (2013), “Assessing the Effectiveness of Passive System of Heat Removal from VVER Containment under Long-Term Blackout” [Otsenka effektivnosti sistemy passivnogo otvoda tepla ot zashchitnoi obolochki RU s VVER v usloviiakh dlitel'nogo obestochivaniia], *Nuclear and Radiation Safety*, Kyiv, No. 2(58), pp. 27–31. (Rus)
15. Naffaa, Kh. M., Dubkovskii, V. A. (2014), “Justification of Circuit Design and Geometric Parameters of C-PHRS for VVER-1000” [Obosnovaniie vybora skhemnogo resheniia i geometricheskikh parametrov SPOT GO VVER-1000], *Nuclear and Radiation Safety*, Kyiv, No. 3(63), pp. 19–23. (Rus)
16. Khabenskii, V. B., Granovskii, V. S., Beshta, S. V., Vitol, S. A., Sulatskii, A. A., Krushynov, E. V. (2011), “Functioning of Thermal Shielding of Corium Confinement Device for VVER NPPs” [Funktsionirovaniie teplozashchitnykh ekranov ustroistva lokalizatsii rasplava AES s VVER], *Thermal Engineering*, No. 4, pp. 37–42. (Rus)
17. Kalinkin, V. I., Kritskii, V. G., Razmashkin, N. V., Tokarenko, A. I., Spichev, V. V., Shafrova, N. P., Erkenov, K. M., Davydenko, N. N., Bepalov, V. N. (2010), “Process for Transfer of RBMK-1000 SNF from Wet to Dry Storage” [Tekhnologicheskii protsess perevoda OYAT RBMK-1000 s mokrogo na sukhoie khraneniie], Saint Petersburg, Beresta, 108 p. (Rus)
18. Patent for Utility Model No. 85484, Ukraine, MPK G21C 13/00, Module of Dry Spent Fuel Storage Facility [Patent na korysnu model No. 85484, Ukraina, MPK G21C 13/00, Modul suchoho skhovyshcha vidpratsiovannoho yadernoho palyva], 2013, Bulletin No. 22. (Ukr)
19. Patent for Utility Model No. 70068, Ukraine, MPK E04B 1/94, Fire Resistant Building Frame [Patent na korysnu model No. 70068, Ukraina, MPK E04B 1/94. Vohnestiikiy karkas budivli], 2012, Bulletin No. 10. (Ukr)

References

1. Gromov, G. V., Dybach, A. M., Zeleny, O. V., Iniushev, V. V., Nosovsky, A. V., Sholomitsky, S. E., Gashev, M. Kh., Mykolai-chuk, Ye. A. (2013), “On Safety Criteria and Requirements for New NPPs in the Light of the Fukushima-I Accident” [O kriteriiakh i trebovaniakh bezopasnosti k novym energoblokam AES v svete urokov avarii na AES “Fukushima-Daichi”], *Nuclear and Radiation Safety*, Kyiv, No. 1(57), pp. 7–9. (Rus)
2. Yu Yu, Wang Shengfei, Niu Fenglei (2013), “Effect of Air Temperature on Failure Prognosis of Passive Containment Cooling System in AP1000”, *Chemical Engineering Transactions*, V. 33. pp. 835–840.
3. Wang, Xianmao; Chang, Huajian; Corradini, Michael; Cong, Tenglong (2016), “Prediction of Falling Film Evaporation on the AP1000 Passive Containment Cooling System using ANSYS FLUENT Code”, *Annals of Nuclear Energy*, V. 95, No. 9, pp. 168–175.
4. Sang Ho Kim, Soon Heung Chang, Yu Jung Choi, Yong Hoon Jeong (2015), “A Passive Decay Heat Removal Strategy of the Inte-

Получено 01.12.2016.