

REFERENCES

1. Kudrin, V. A. (2001) Prospects for Usage of Acid Steel-Making Processes. *Stal [Steel]*, (11), 15–17.
2. Gubinsky, V. I. (2006) *Metallurgic Furnaces*. Dnepropetrovsk: National Metallurgical Academy of Ukraine.
3. Faktorovich, L. M. (1966) *Thermal Insulation*. Leningrad. Nedra.
4. Soyfer, V. M. (2009) *Steel Melting in Acid Electric Furnaces*. Moscow, Mechanical Engineering.
5. Vasil'kova, S. B., Genkina, M. M., Gusovskii, V. L., Lifshits, A. E., Masalovich, V. G., Perimov, A. A., Spivak, E. I., & Tymchak, V. M. (1983) *Calculation of Heating and Thermal Furnaces*. Moscow, Metallurgia.
6. Babichev, A. P., Babushkina, N. A., Bratkovskii, A. M., Brodov, M. E., & Bystrov, M. V. (1991) *Physical Quantities*. Moscow, Energoatomizdat.
7. Chirkov, V. S. (1967) *Thermal-Physical Properties of Materials in Nuclear Engineering*. Moscow, Atomizdat.
8. Timoshpolsky, V. I., & Korneev, S. V. (2007) Influence of Geometric and Thermal-Physical Parameters of Charging Material on its Heating Rate. *Nauka – Obrazovaniiu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 5 Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii* [Proceedings of the 5th International Technical Conference on Science for Education, Industry, Economy]. Minsk: BNTU, Vol. 1, 236–241.

Представлена кафедрой
металлургических технологий

Поступила 15.07.2013

УДК 621.039.586

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ОТВОДА ОСТАТОЧНЫХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЙ ОТ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ АЭС С ВВЭР

Инж. ХАЛЕД Н., канд. техн. наук ШЕВЕЛЕВ Д. В., инж. БАЛАШЕВСКИЙ А. С.

*Севастопольский национальный университет
ядерной энергии и промышленности*

E-mail: balaas@ua.fm

CLASSIFICATION OF SYSTEMS FOR PASSIVE AFTERHEAT REMOVAL FROM REACTOR CONTAINMENT OF NUCLEAR POWER PLANT WITH WATER-COOLED POWER REACTOR

KHALED N., SHEVELEV D. V., BALASHEVSKY A. S.

Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry

Разработана классификация систем пассивного отвода остаточных тепловыделений от защитных оболочек ядерных реакторов, что позволяет провести детальный анализ различных концепций систем пассивного отвода остаточных тепловыделений от защитных оболочек ядерных реакторов нового поколения. Рассмотрены основные классификационные признаки данных систем.

Ключевые слова: система пассивного отвода остаточных тепловыделений, ядерный реактор, защитная оболочка.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.

A classification on systems for passive afterheat removal from reactor containment has been developed in the paper. The classification permits to make a detailed analysis of various concepts pertaining to systems for passive afterheat removal from reactor containment of new generation. The paper considers main classification features of the given systems.

Keywords: system for passive afterheat removal, nuclear reactor, containment.

Fig. 4. Tab. 1. Ref.: 5 titles.

При анализе существующих концепций систем пассивного отвода остаточных тепловыделений защитных оболочек (СПОТ ЗО) ядерных реакторов можно обнаружить многообразие схемных и конструкционных решений, притом каждая отдельно взятая система имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому для проведения детального анализа конкретной схемы и предлагаемого технического решения для новых проектов ядерных энергетических установок (ЯЭУ) необходима детальная классификация СПОТ ЗО, которая могла бы охватить весь спектр разных схемных решений и концепций. В этом контексте нужно рассмотреть классификацию СПОТ ЗО как инструмента анализа технических решений, заложенных при реализации задачи обеспечения полного и надежного охлаждения ЗО. Причем такая классификация не должна противоречить общепринятым принципам, заложенным в действующих нормативных документах. Цель – более детально классифицировать СПОТ ЗО, расширять и углублять представление специалиста об их назначении и влиянии на безопасность, о характере выполняемых функций безопасности и особенностях их реализации.

Классификация системы, которая содержит один или несколько пассивных элементов, впервые была рассмотрена и проанализирована в 1991 г. в документе МАГАТЭ «IAEA-TECDOC-626» [1], применяемом для разрабатываемых на тот период пассивных систем усовершенствованных реакторов. Согласно этому документу, существуют четыре категории пассивных систем (A, B, C, D), характеризующие так называемую степень пассивности (degree of passivity). Эти категории (табл. 1) были рекомендованы для качественной оценки и общей классификации любой системы, которая состоит из пассивных элементов или использует незначительное количество активных элементов для запуска связанных с ней пассивных систем.

Таблица 1

Категории пассивных систем

Признак	Категория			
	A	B	C	D
Входной управляющий сигнал	-	-	-	+
Внешний энергоисточник	-	-	-	+
Движущиеся механические части	-	-	+	+
Движущиеся рабочие жидкости	-	+	+	+

В указанном документе компонент или система называются пассивными, когда выполняются следующие требования: присутствие сигнала или параметрические изменения для инициирования действий; наличие разно-

сти потенциалов (т. е. движущей силы) для изменения первоначального состояния; наличие средств или механизмов для продолжения работы в новом состоянии.

Определение СПОТ в существующих нормативных документах отсутствует. Его можно найти только в научной литературе, а также в проектной документации для реакторной установки (РУ) нового поколения. СПОТ, по определению главного конструктора РУ типа ВВЭР [2] (ОКБ «Гидропресс»), предназначена для отвода остаточного тепловыделения от активной зоны реактора при обесточивании АЭС, с потерей всех источников переменного тока до 24 часов [3].

Основной нормативный документ – НП 306.1.02/1.034–2000 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» [4] – для деления пассивных систем предусматривает только один классификационный признак – конструкционный. Согласно этому признаку, все пассивные системы делятся на две категории: с механическими движущимися частями (например, обратные клапаны) и без механических движущихся частей (например, трубопроводы, сосуды) [3].

Первая подробная классификация СПОТ была разработана И. И. Свириденко [3, 5]. Она включает четыре классификационных признака. Подобная классификация позволяет проводить анализ системы по следующим характеристикам: назначению; функционированию; физическому процессу, реализуемому в системе; схеме организации отвода теплоты; применяемому оборудованию.

Рассмотренная классификация СПОТ систематизирует все существующие и разрабатываемые системы отвода остаточной теплоты, функционирование которых реализуется в пассивном режиме, и охватывает схемы СПОТ всех известных проектов РУ и концептуальных решений перспективных ЯЭУ [3].

На основании проведенного авторами анализа различных проектов новых РУ и научных публикаций по использованию СПОТ ЗО были установлены определенные закономерности и общие подходы в формировании классификации. Такой анализ дал основание разработать классификацию СПОТ, которая представлена в [3, 5]. Подобная классификация позволяет проводить анализ системы по следующим признакам: материалу ЗО; характеру охлаждения; механизму конденсации пара, реализуемого в системе; типу СПОТ ЗО; типу конечного поглотителя; типу контура охлаждения; режиму работы; механизму теплообмена; движущей силе охладителя.

Первый классификационный признак определяет материал первичной защитной оболочки, поскольку именно ее материал играет основную роль в теплообмене. Здесь важно подчеркнуть особенности использования стали как единственного материала для первичной защитной оболочки РУ, поскольку в этом случае ЗО используется как поверхность теплообмена (например, проект АР-600/АР-1000, где применяется наружное распыление от наружного напорного бака или концепция погружения ЗО в водяной шахте). В тех проектах, где сталь используется в качестве облицовки для первичной ЗО (как на ВВЭР-1000), она не охлаждается снаружи. Сталь, кроме непроницаемости и прочности, выполняет функцию поверхности охлаждения для контейнента благодаря высокому коэффициенту тепло-

проводности и малой толщине (порядка 6 мм). Бетон из-за его прочности и дешевизны используется в качестве материала для вторичной ЗО.

По характеру охлаждения СПОТ ЗО могут быть с наружным и внутренним охлаждением. В первом случае это варианты СПОТ ЗО с наружным распылением, наружным погружением или наружным конденсатором. Это возможно реализовать, когда ЗО используется как поверхность теплообмена или когда пар собирается специальным пароприемником внутри ЗО и охлаждается в наружном конденсаторе, расположенном внутри специального бассейна, как на проектах ESBR, SBR. Во втором случае используются теплообменники-конденсаторы – как в проектах ВВЭР-640, SWR-1000, так и в бассейне снятия давления (проект IRIS или LIRA).

Второй классификационный признак определяет механизм конденсации пара, реализуемого в системе пассивного охлаждения ЗО – пленочная и капельная конденсация. В первом случае конденсат осаждается в виде отдельных капель, во втором – в виде сплошной пленки.

Коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации в 5–10 раз больше, чем при пленочной. Основным механизмом конденсации пара в большинстве СПОТ ЗО остается пленочная конденсация, но в варианте спот ЗО с бассейном снятия давления, когда пар конденсируется в объемном пространстве бассейна, происходит капельная конденсация.

Третий признак определяет тип ЗО, который является, пожалуй, самым важным в классификации.

Конечным поглотителем может быть вода, например, как в проектах ВВЭР-640, SWR-1000, ESBR, где применяется внешний конденсатор, расположенный внутри бассейна, заполненного охлаждающей водой. Воздух уступает воде по охлаждающей способности (теплоемкость почти в четыре раза меньше, чем у воды), но его использование в качестве конечного поглотителя становится неизбежным в тех проектах, которые расположены в сухой местности, где наблюдается недостаток воды. Некоторые проекты, например американский AP-600/AP-1000, используют воду и воздух. В этом случае воздух продолжает осуществлять охлаждение, когда запас охлаждающей воды заканчивается.

Четвертый классификационный признак определяет тип контура охлаждения, который является открытым во всех вариантах СПОТ ЗО, кроме варианта с замкнутым термосифоном. Контур должен быть герметичен, поскольку здесь необходимо поддерживать полный вакуум, чтобы обеспечивать эффективный теплообмен, используя теплоту фазового перехода при относительно низкой температуре.

Пятый классификационный признак характеризует режим работы СПОТ ЗО. Некоторые концепции СПОТ требуют первичного действия (сигнала) для срабатывания системы, т. е. для открытия клапана подачи воды, например варианты с наружным или внутренним распылением – AP-600/AP-1000, ACR-1000. Другие варианты, такие как СПОТ с бассейном снятия избыточного давления (IRIS), либо варианты с внутренними (SWR-1000) или внешними (ESBR) конденсаторами, либо с замкнутым термосифоном, не требуют никаких сигналов и находятся в состоянии готовности.

Обзор существующих систем охлаждения ЗО различных типов ядерных реакторов позволяет выделить концепции СПОТ для охлаждения ЗО, представленные на рис. 1–4.

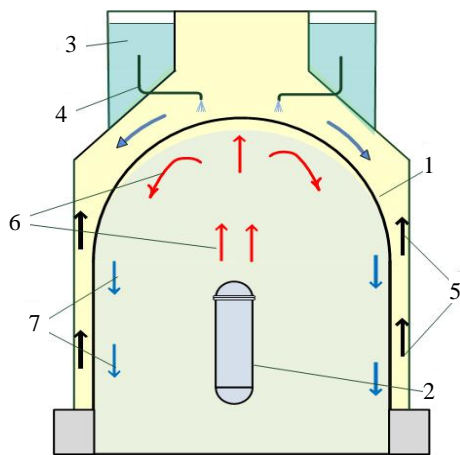


Рис. 1. СПОТ с наружным распылением для проекта AP-600: 1 – стальная защитная оболочка; 2 – реактор; 3 – бассейн охлаждающей воды; 4 – пассивная спринклерная система; 5 – движение воздуха; 6 – движение пара; 7 – движение конденсата

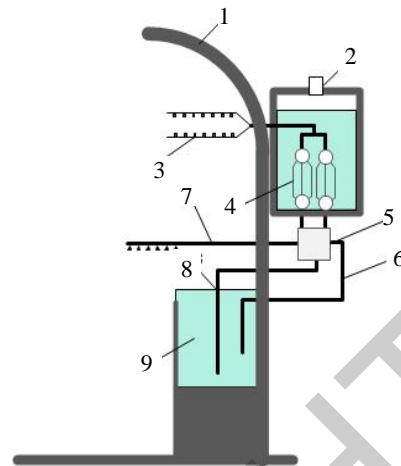


Рис. 2. СПОТ с внешними конденсаторами: 1 – защитная оболочка; 2 – вентиляционная система с фильтрами; 3 – пароприемники; 4 – наружный конденсатор; 5 – нижняя камера; 6 – вентиляционная труба; 7 – пассивное распыление; 8 – линия возврата конденсата; 9 – бассейн

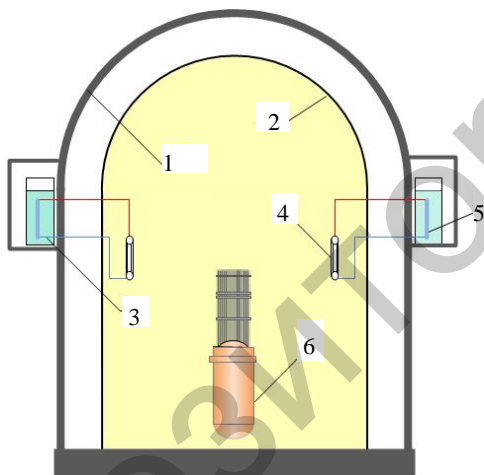


Рис. 3. СПОТ 30 для проекта ВВЭР-640: 1, 2 – вторичная и первичная защитная оболочка; 3 – бак СПОТ; 4 – внутренний конденсатор (теплообменник); 5 – конденсатор; 6 – реактор

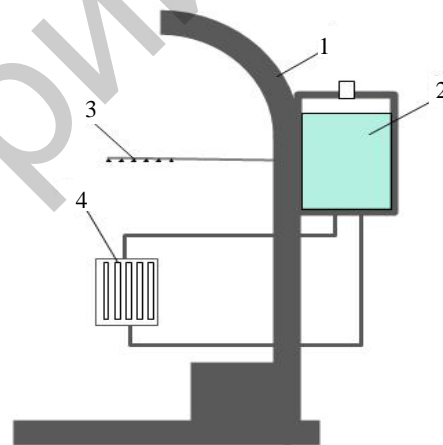


Рис. 4. СПОТ с внутренними конденсаторами (с внутренним распылением): 1 – защитная оболочка; 2 – бассейн; 3 – пассивное распыление; 4 – внутренний конденсатор

По механизму теплообмена концепции СПОТ 30 можно разделить на две основные группы: использующие, помимо конвекции, еще и тепловое излучение и использующие в основном конвекцию. В первом случае материалом для первичной ЗО является сталь, во втором – бетон.

По движущей силе охладителя можно сказать, что основной принцип работы всех пассивных систем охлаждения – это естественная циркуляция, обусловленная силами гравитации. Но в тепловой трубе, которая содержит наполнитель, т. е. на внутренней стенке, укреплен фитиль, сделанный,

например, из нескольких слоев тонкой сетки, конденсат возвращается в испаритель под действием капиллярных сил. Поэтому, в отличие от термосифона, тепловая труба может работать в любом положении, в том числе и в горизонтальном.

ВЫВОДЫ

Разработка классификации систем пассивного отвода остаточных тепловыделений от защитных оболочек является закономерным и необходимым этапом процесса исследования пассивных систем безопасности реакторной установки АЭС нового поколения. Рассмотренная в статье классификация предложена впервые и позволяет систематизировать существующие и разрабатываемые системы отвода остаточной теплоты от защитной оболочки ядерного реактора, функционирование которых реализуется в пассивном режиме. Она использует девять классификационных признаков и охватывает схемы систем пассивного отвода остаточных тепловыделений от защитных оболочек всех известных проектов реакторных установок и концептуальных решений перспективных ядерных энергетических установок.

Предложенная классификация может стать инструментом анализа рассматриваемого технического решения, закладываемого в проект с целью выполнения задачи обеспечения безопасности в условиях отвода остаточных тепловыделений реакторных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Safety Related Terms for Advanced Nuclear Plants: IAEA-TECDOC-626. – Vienna, 1991. – P. 14–18.
2. Логвинов, С. А. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР / С. А. Логвинов, Ю. А. Безруков, Ю. Г. Драгунов. – М.: ИКЦ Академкнига, 2004. – 255 с.
3. Свириденко, И. И. Классификация систем пассивного отвода теплоты ЯЭУ / И. И. Свириденко // Сб. науч. тр. СТУЭиП. – 2007. – Вып. 2 (22). – С. 169–180.
4. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций: НП 306.1.02/1.034–2000. – Киев: ГАЯР Украины, 2000. – 24 с.
5. Свириденко, И. И. Классификация систем пассивной тепловой защиты ядерно-опасных объектов с использованием тепловых труб / И. И. Свириденко // Ядерная и радиационная безопасность. – 2005. – № 4. – С. 37–48.

REFERENCES

1. Safety Related Terms for Advanced Nuclear Plants. IAEA-TECDOC-626. Vienna, IAEA, 1991, 14–18.
2. Logvinov, S. A., Bezrukov, Yu. A., & Dragunov, Yu. G. (2004) Experimental Validation of Thermohydraulic Reliability of WWER Reactors. Moscow, IKTs Akademkniga.
3. Sviridenko, I. I. (2007) Classification on Systems for Passive Heat Removal in NPP. *Sbornik Nauchnykh Trudov Sevastopol'skogo Natsional'nogo Universiteta Iadernoi Energetiki i Promyshlennosti* [Collection of Scientific Works of Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry]. Sevastopol, Issue 2 (22), 169–180.
4. НП 306.1.02/1.034–2000. General Requirements for Provision of Security at Nuclear Power Stations. Kiev: State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2000. (In Russian, Unpublished).
5. Sviridenko, I. I. (2005) Classification on Systems of Thermal Passive Protection of Nuclear and Hazardous Objects While Using Heat Pipes. *Iadernaia i Radiatsionnaia Bezopasnost'* [Nuclear and Radiation Safety], (4), 37–48.

Представлена кафедрой ПТУ и ВМ

Поступила 04.04.2013