

Лугавцов Олег Валентинович,
доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды,
кандидат технических наук,
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АТОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК «ЛИРА»

Аннотация: В два последних десятилетия существования СССР в составе военно-морского флота находились многоцелевые атомные подводные лодки проектов 705 и 705К (общее название «Лира») с ядерным реактором на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (эвтектический сплав свинец-висмут) первого контура ядерной энергетической установки. В этих кораблях технически были внедрены самые передовые достижения науки того времени. Это был первый опыт применения в транспортных ядерных энергетических установках в качестве теплоносителя первого контура, эвтектического сплава свинец-висмут. Данный сплав очень текуч и может находиться в жидком состоянии, при температуре выше 124°C. При контакте с кислородом вызывает зашлаковывание контура оксидами свинца, что требовало строгого регламента по контролю и поддержанию качества теплоносителя по содержанию в сплаве растворенного кислорода. В активной зоне реактора, при облучении нейтронами сплава свинец-висмут, в результате ядерной реакции, получался полоний-210, который является практически чистым альфа-излучателем. Полоний-210 чрезвычайно токсичен (особо радиотоксичен) и канцерогенен. Особенно опасны альфа-частицы при попадании внутрь организма и не только за счет ионизирующего излучения, но и просто как ядовитые вещества, альфа-частицы необратимо вызывают опасные радиобиологические эффекты внутри организма человека. Эти и другие факторы вызывали повышенные специфические требования к обеспечению ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации данных кораблей [1].

Ключевые слова: ядерная реакция, эвтектический сплав свинец-висмут, жидкометаллический теплоноситель, активная зона реактора, альфа-частица, гамма-излучение, полоний-210, ядерная энергетическая установка.

Одними из основных, требований, при создании образцов военной техники с ядерной энергетикой, для ведения вооруженной борьбы во всех средах атмосферы и на море в частности, являются требования по обеспечению ядерной и радиационной безопасности.

Начиная с 1958 г. в Советском Союзе было создано четыре поколения атомных подводных лодок (АПЛ) различных проектов. К 1995 г. в России их насчитывалось 245 единиц [2]. Из которых 238 АПЛ с водо-водяным реактором, в котором в качестве теплоносителя используется вода высокой чистоты и 8 АПЛ (только о них далее пойдет речь) у которых ядерный реактор с жидко – металлическим (эвтектика свинец-висмут) теплоносителем (ЖМТ). Жидкая эвтектика представляет собой раствор или расплав, кристаллизующийся при температуре более низкой, чем температура кристаллизации каждого из веществ, входящих в состав смеси. Соответственно, температура плавления твёрдой эвтектики – самая низкая для данной смеси компонентов [3,4]. Такой реактор, в частности, был установлен на первой из этой серии, многоцелевой подводной лодке первого поколения К-27 (проект 645). После ядерной аварии в мае 1968 г., во время похода произошел разрыв первого технологического контура реактора. Экипаж получил большие дозы облучения. Лодку окрестили «Нагасаки».



АПЛ была столь радиоактивна, что не подлежала ремонту, была создана угроза загрязнению территории пункта базирования кораблей. В итоге в сентябре 1982 года лодка была выведена из эксплуатации и затоплена на глубине 50 м у северо-восточных берегов острова Новая Земля [5]. АПЛ пр.645 дала возможность создать серию из 7-ми ПЛА проектов 705 и 705К под общим названием «Ли́ра».

Важнейшим элементом ядерной энергетической установки (ЯЭУ) подводных лодок «Ли́ра», были компактные ядерные реакторы БМ-40А и ОК-550 на быстрых нейтронах с теплоносителем свинец-висмут. БМ-40А был установлен на трех лодках проекта 705К, а ОК-550 на четырех лодках проекта 705, [2]. Эти реакторы позволяли сократить водоизмещение, диаметр прочного корпуса и длину подводной лодки, увеличить скорость подводного хода. Благодаря этому принципиальным отличием новой ЯЭУ являлись компактность, блочность компоновки, высокая степень автоматизации и маневренность, хорошие экономические и массогабаритные показатели.

Эвтектический сплав свинец-висмут состоит на 55% из висмута и на 45% из свинца и может находиться в жидком состоянии при температуре выше 124°C. Благодаря висмуту, этот сплав крайне легкоплавкий и обладает способностью накапливать теплоэнергию. Температура кипения сплава свинец-висмут равна 1670° С, что позволяет использовать его для передачи тепла до этой температуры без образования пузырьков. Следует отметить, что плотность сплава свинец-висмут слабо зависит от температуры и при ее повышении незначительно уменьшается. Также не зависит, от его температуры и удельная теплоемкость сплава и составляет величину 147 Дж/ (кг·град). Теплопроводность этого сплава меньше, чем теплопроводность свинца и имеет немногим большее значение, чем у висмута. Коэффициент температуропроводности сплава свинец-висмут увеличивается при повышении его температуры, а его кинематическая вязкость при этом уменьшает свое значение.

В активной зоне реактора с ЖМТ, при облучении нейтронами, в результате ядерной реакции, висмута-209 получается висмут-210 [11]:



Затем, висмут-210 испытывает бета-распад и превращается в полоний -210 (см. рис. 1). Период полураспада висмута-210, $T_{1/2}=5.013$ дней. Период полураспада полония – 210, $T_{1/2}=138.376$ дней, т.е. за это время первоначальное количество полония – 210 уменьшается вдвое и превращается в ядра стабильного изотопа свинца-206 [10]. Превращение полония -210 в свинец-206 происходит в результате альфа-распада [11]:



Таким образом кроме ядер свинца-206 при распаде полония-210 образуются также ядра гелия-4, которые обычно называют альфа-частицами. Причем полоний-210 является практически чистым альфа-излучателем. Альфа-распад, если он происходит не на основное или не только на основное состояние конечного ядра, сопровождается гамма-излучением. В подавляющем количестве случаев полоний-210 распадается на основное состояние свинца-206 с испусканием альфа-частиц с энергией 5.3 МэВ, и только ничтожная доля (0.00122%) ядер полония-210 распадается на возбужденное (803 кэВ) состояние свинца-206, которое распадается с испусканием гамма-квантов [10,13]. Проникающая способность и длина пробега альфа-частицы в плотном веществе минимальны. Полоний-210 чрезвычайно токсичен и канцерогенен [12,13]. Особо радиотоксичен [14,15]. Его удельная активность (166 ТБк/г, тепловыделение 148 Вт/г) настолько велика, что, хотя он излучает только альфа-частицы, брать его руками нельзя, поскольку результатом будет лучевое поражение кожи и, возможно, всего организма. Особенно опасны альфа-частицы при попадании внутрь организма через органы дыхания и пищеварения, открытые раны и ожоговые поверхности, и не только за счет ионизирующего излучения, но и просто как ядовитые вещества.





Рис 1. Схема наработки на реакторе полония-210 и его распада [11,12].

Альфа-частицы необратимо вызовут опасные радиобиологические эффекты внутри организма человека (в первую очередь они обусловлены радиоллизом воды), что может привести к мутациям, развитию злокачественных заболеваний (среди них – лейкоз), нарушению кроветворения и гибели [16]. Ролоний-210 опасен и на расстоянии, превышающем длину пробега альфа-частиц, т.к. его соединения саморазогреваются из-за очень сильного удельного тепловыделения и переходят в аэрозольное состояние. Предельно-допустимая концентрация в водоёмах и в воздухе рабочих помещений $11,1 \times 10^{-3}$ Бк/л и $7,41 \times 10^{-3}$ Бк/м³ [16,17].

По оценке специалистов, летальная доза полония-210 для взрослого человека оценивается в пределах от $0,1 \div 0,3$ ГБк ($0,6 \div 2$ мкг) – при попадании изотопа в организм через лёгкие и до $1 \div 3$ ГБк ($6 \div 18$ мкг) – при попадании в организм через пищеварительный тракт [17].

В организме человека полоний ведёт себя подобно своим химическим гомологам, селену и теллуру, концентрируется в печени, почках, селезёнке и костном мозге. Период полувыведения из организма от 30 до 50 дней, выделяется в основном через почки. Наличие полония у зараженных им людей идентифицируется по слабому гамма-излучению выделений [17,18].

Различные типы ионизирующих излучений (альфа, бета, гамма) имеют заметно отличные проникающие способности. Альфа-частицы от радиоактивных изотопов, пролетая через вещество, легко подхватывают электроны и превращаются в атомы гелия. Так для того, чтобы превратиться в гелий, альфа-частицам полония-210 достаточно пролететь в воздухе меньше 4 см, в биологической ткани – меньше 50 мкм, в алюминии – меньше 30 мкм. Таким образом, альфа-излучение от радиоактивных источников не может быть зафиксировано обычными дозиметрами, в которых используются счетчики Гейгера. Альфа-частицы таких энергий не пройдут через корпус счетчика, даже если альфа-радиоактивным изотопом



измазать его. Обнаружить его излучение не смогут и более чувствительные устройства, такие, например, как полупроводниковые или сцинтилляционные детекторы. Последние могут помочь зафиксировать альфа-излучение, если они будут находиться в непосредственной близости от "открытого" источника радиоактивного загрязнения. Это одна из не малого количества сложностей в обеспечения радиационной безопасности (РБ) на АПЛ «Лира» и в пунктах их базирования. В процессе эксплуатации этих кораблей неоднократно возникали радиационно-опасные ситуации. Так, например на одной из лодок в 1982 году, когда лодка находилась в подводном положении в Баренцевом море, на пульте управления в центральном посту неожиданно загорелся сигнал «Неисправность реактора». После выяснения обстановки в необитаемом реакторном отсеке, стало ясно, что по палубе растекается серебристый металл, это был вырвавшийся из первого контура реактора высокоактивный ЖМТ. Одновременно включился сигнал «Загрязнение реакторного отсека. Покинуть отсек!». Реактор был заглушен, лодка всплыла. Как установили позже, из первого контура успело вытечь порядка 2 т ЖМТ с удельной радиоактивностью более 2,8 Кюри/л. Высокая активность и проникаемость полония-210 существенно ухудшали радиационную обстановку на корабле. Лодка была так загрязнена, что командование пришедшего на помощь крейсера не решалось приблизиться к ней, чтобы передать буксирный трос. В итоге трос все же завели при помощи палубного вертолета с того же крейсера [8].

В пункте базирования лодки «Лира» швартовались у специально выделенного пирса, подключенного к разработанной и созданной для этих кораблей, технической береговой системе поддержания эвтектического сплава в жидком (расплавленном) состоянии. Для контроля радиационной обстановки на корабле, в третьем отсеке находилась автоматическая система радиационного контроля «Альфа». Контроль за состоянием окружающей среды в пункте базирования осуществляла служба радиационной безопасности (СРБ) флотилии АПЛ. Все мероприятия по оценке состояния активной зоны реактора проводила специально созданная в СРБ физико-химическая лаборатория (по первому классу допуска для работ с радиоактивными веществами), оборудованная по последнему слову техники. Одной из радиационно-опасных работ этой лаборатории было взятие проб технологической среды (ЖМТ) первого контура реактора ЯЭУ.

На всех этапах эксплуатации ЯЭУ с ЖМТ, как и на водо-водяных ЯЭУ, выполняется ряд операций, которые классифицируются как радиационно- и ядерно-опасные. К ним относятся работы, которые с наибольшей вероятностью могут привести к возникновению ядерной или радиационной аварии. В конечном итоге могут создать чрезвычайно опасные последствия в окружающей природной среде пункта базирования. Перечень потенциально ядерно- и радиационно-опасных работ определен руководящими документами по ядерной и радиационной безопасности. Ядерная авария характеризуется совокупностью следующих критериев: -возникновение и развитие неуправляемой цепной реакции деления; -нарушение теплоотвода от активной зоны ядерного реактора. В результате этих событий, с большой вероятностью, может произойти радиационное облучение личного состава корабля, значительно превышающие предельно-допустимые дозы и повреждение элементов ядерного реактора в такой степени, что эксплуатация его невозможна. Мероприятия (технические и организационные), которые должны выполняться при проведении потенциально опасных работ, разрабатывает, как правило, проектант ЯЭУ. Контроль за выполнением этих мероприятий возложен на органы контроля за ядерной и радиационной безопасностью.

Сейчас, оглядываясь назад, следует признать, что был создан уникальный корабль, в котором были использованы революционные, намного опережающие своё время технические решения. Атомные подводные лодки «Лира» сыграли огромную роль в дальнейшем развитии проектирования и постройки многоцелевых АПЛ следующих поколений. К сожалению,



отсутствие чётко налаженного и надёжного обслуживания реакторов с ЖМТ, неоднозначное отношение к проекту среди тогдашнего военного руководства, а потом и «перестройка» с последовавшим всеобщим «развалом» сыграли роковую роль в судьбе этих кораблей и ядерных энергетических установок с ЖМТ. Кораблей, оборудованных ядерным реактором с ЖМТ в составе ВМФ РФ сегодня нет. Все выведены из эксплуатации и утилизированы без реакторных отсеков. Их реакторные отсеки находятся в местах отстоя с не изъятими активными зонами под строгим контролем экологической безопасности в данных районах, с постоянным (согласно утверждённым регламентам) измерением показателей ядерной и радиационной обстановки.

На основании всего выше изложенного, следует заметить, что у эвтектического сплава свинец-висмут, после детального, глубокого изучения и освоения технологии эффективного и безопасного его обслуживания, есть недалёкое будущее в дальнейшем кораблестроении, ракетостроении, создании объектов для освоения космического пространства, полётов на другие планеты и в других областях человеческой деятельности.

Список литературы:

1. Федеральный закон от 09.01.1996 N 3-ФЗ (ред. от 18.03.2023) "О радиационной безопасности населения"
2. "Военные корабли СССР и России, 1945-1995 г.", Павлов А.С., г. Якутск, 1994 г.
3. Петров Д. А. Двойные и тройные системы. – М.: Металлургия, 1986. – 256 с.
4. Сомов А. И., Тихоновский М. А. Эвтектические композиции. – М.: Металлургия, 1975. – 304 с.
5. Яблоков А.В., "Факты и проблемы, связанные с захоронением радиоактивных отходов в морях, омывающих территорию Российской Федерации", М., 1993 г.
6. Чудо инженерии – подлодки проекта 705 Лира // svpressa.ru >> МОДВ АЭП – veteranrosatom.ru, 16 марта 2017 г.
7. Апальков Ю. В. Подводные лодки Советского Союза. 1945-1991 гг. Т. III. – С. 232-233.
8. Субмарина-истребитель проекта 705 // Популярная механика, 19.10.2021 г.
9. "Отечественное военное кораблестроение в третьем столетии своей истории", В.Буров, С.- П., 1995 г.
10. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Обвинцев Г.В. Гамма-излучение радиоактивных изотопов и продуктов деления. Теория и таблицы. Государственное издательство физико-математической литературы. М. 1958 г.
11. Жуйков Б. Зачем был нужен полоний? Троицкий вариант-Наука. М. 10.12.2015. №172. С. 6-7. (<https://www.trv-science.ru/2015/02/zachem-by-l-nuzhen-polonium/>)
12. Ершова З.В., Волгин А.Г. Полоний и его применение. М.: Атомиздат, 1974 г. Harrison J. et al. Polonium-210 as a poison // J. Radiological Protection. 2007. V. 27. P. 17–40.
13. Harrison J. et al. Polonium-210 as a poison // J. Radiological Protection. 2007. V. 27. P. 17–40.
14. Радиоактивные вещества / ред. Ильин Л.А., Филов В.А. Л.: Химия, 1990 г.
15. Глав. ред.: Н. С. Зефиров. Химическая энциклопедия / Н. С. Зефиров. – Москва: Большая Российская Энциклопедия, 1995. – Т. 4. – С. 53. – 639 с. – (5 томов). – 20 000 экз.
16. Medical News Today – Polonium-210.
17. Человек, поражённый полонием-210, не может оставлять после себя следы. Архивная копия от 28 апреля 2018 на Wayback Machine // РИА НОВОСТИ, 11 декабря 2006.
18. Популярная библиотека химических элементов. Полоний. (<http://n-t.ru/ri/ps/pb084.htm>).

