

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫХОДА ПОЛОНИЯ ИЗ ТЖМТ В ГАЗОВУЮ ФАЗУ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ ГНЦ РФ-ФЭИ

Н.И. Гончар, Д.В. Панкратов

ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Для содержащих свинец и висмут тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) характерно образование изотопов альфа-излучателей: ^{210}Po , ^{209}Po и $^{210\text{m}}\text{Bi}$. Из них наиболее высокой радиотоксичностью обладает ^{210}Po . В условиях нормальной эксплуатации при сохранении герметичности первого контура полоний не представляет сколько-нибудь значительной радиационной опасности, но при проектировании газовой системы реактора и систем перегрузки необходимо учитывать наличие альфа-активности с большой энергией и токсичность самого полония. Также следует учитывать, что в результате аварийных ситуаций, сопровождающихся проливом теплоносителя первого контура или значительной разгерметизацией газовой системы, возможно образование альфа-активных аэрозолей в воздухе и высокоактивных поверхностных загрязнений после их осаждения. Гамма-излучение ^{210}Po незначительно, и в качестве внешнего излучателя он не представляет опасности. Наибольшее поражение организма вызывает поступление ^{210}Po пероральным и ингаляционным путем, также опасно его попадание на слизистые оболочки и кожу. Поэтому при моделировании миграции полониевой активности и разработке способов и средств защиты персонала особое внимание уделяют аэрозолям – газообразному соединению полония – PoH_2 , которое образуется при взаимодействии соединений полония с водяным паром. Для обоснования радиационной безопасности и прогнозирования последствий аварий указанного типа необходима модель распространения полониевой активности по первому контуру в нормальных условиях эксплуатации РУ и в ситуациях, приводящих к аварии. Модель должна быть проверена по экспериментальным данным. Главным звеном такой модели является выход полониевой активности из теплоносителя в газовую фазу. Большинство исследований испарения полония из расплава ТЖМТ в газ или вакуум выполнено со свинцово-висмутовой (СВЭ) и свинцово-литиевой эвтектикой (СЛЭ). Выход полония из свинца исследован в меньшей степени, чем из свинцовых эвтектик.

В 1995 г. в ГНЦ РФ-ФЭИ были выполнены лабораторные исследования испарения полония из тяжелых жидкометаллических теплоносителей: свинца, свинцово-висмутовой и свинцово-литиевой эвтектик в вакуум и в атмосферу аргона при температуре 300, 500 и 800 °С. В работе представлены полученные по этим экспериментальным данным значения эффективного давления полония над расплавом и коэффициент термодинамической активности полония в теплоносителе. Сделано сравнение с полученными ранее результатами других исследователей.

Ключевые слова: полоний, испарение, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, эффективное давление насыщенных паров, коэффициент термодинамической активности.

В концепции предельно безопасных ядерных реакторов будущей энергетики заметное место занимают реакторы, охлаждаемые расплавом свинца или свинцово-висмутовой эвтектики. В одном из вариантов воспроизводящего тритий blanketа проекта термоядерного реактора рассматривается эвтектический сплав свинец-литий. Определенное развитие за последние два десятилетия получила концепция разработки электроядерных установок, в которых в качестве жидкометаллической мишени предполагается использование расплавов свинца или свинцово-висмутовой эвтектики.

Для содержащих свинец и висмут тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) характерно образование изотопов альфа-излучателей: ^{210}Po ($T_{1/2} = 138,4$ сут), ^{209}Po ($T_{1/2} = 102$ года) и $^{210\text{m}}\text{Bi}$ ($T_{1/2} = 3,6 \cdot 10^6$ лет). Из них наиболее высокой радиотоксичностью обладает ^{210}Po . Распадаясь, он излучает альфа-частицу с энергией 5,3 МэВ и превращается в ^{206}Pb . В условиях нормальной эксплуатации при сохранении герметичности первого контура полоний не представляет сколько-нибудь значительной радиационной опасности, но при проектировании газовой системы реактора и систем перегрузки необходимо учитывать наличие альфа-активности и токсичность полония. Также следует учитывать, что в результате аварийных ситуаций, сопровождающихся проливом теплоносителя первого контура или значительной разгерметизацией газовой системы, возможно образование альфа-активных аэрозолей в воздухе реакторного помещения и высокоактивных поверхностных загрязнений после их осаждения.

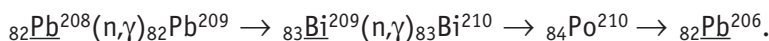
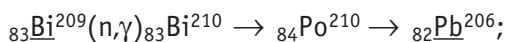
Гамма-излучение ^{210}Po незначительно, и в качестве внешнего излучателя он не представляет опасности. Наибольшее поражение организма вызывает поступление ^{210}Po пероральным и ингаляционным путем, также опасно его попадание на слизистые оболочки и кожу. Поэтому при моделировании миграции полониевой активности и разработке способов и средств защиты персонала особое внимание уделяют аэрозолям и газообразному соединению полония PoH_2 , которое образуется при взаимодействии соединений полония с водяным паром.

Для обоснования радиационной безопасности и прогнозирования последствий аварий указанного типа необходима проверенная по экспериментальным данным модель распространения полониевой активности по первому контуру в нормальных условиях эксплуатации и в ситуациях, приводящих к аварии. Ключевым звеном такой модели является выход полониевой активности из теплоносителя в газовую фазу. Большинство исследований испарения полония из расплава ТЖМТ в газ или вакуум выполнено со свинцово-висмутовой (СВЭ) и свинцово-литиевой эвтектикой (СЛЭ). Выход полония из свинца исследован в меньшей степени.

В 1995 г. в ГНЦ РФ-ФЭИ были проведены лабораторные исследования выхода ^{210}Po из облученных образцов различных ТЖМТ при нагревании в вакууме и в среде инертного газа. Измерялась активность ^{210}Po , вышедшая из образцов, нагретых до установленной температуры и выдержанных в таких условиях определенное время. В качестве образцов были использованы свинцово-висмутовая эвтектика (44,5 вес.% Pb + 55,5 вес.% Bi), свинец и свинцово-литиевая эвтектика (83 вес.% Pb + 17 вес.% Li). Измерения выполнялись при температурах 300, 500 и 800 °С. Испарение полония происходило в вакуум (0,1 – 1 Па) и в аргон ($1,33 \cdot 10^4$ и $8,65 \cdot 10^4$ Па). Продолжительность испарения восемь часов. В качестве исходных данных известны поверхность испарения, масса и активность образцов. Измерялось количество вышедшей активности ^{210}Po .

Целью работы является анализ этих экспериментальных данных, оценка по ним основных характеристик испарения полония из указанных ТЖМТ и сравнение полученных результатов с данными, опубликованными другими исследователями.

При облучении ТЖМТ нейтронами ^{210}Po нарабатывается на висмуте и свинце



Летучие компоненты теплоносителя, в том числе полоний и его химические соединения, испаряются с поверхности зеркала теплоносителя и выходят в защитный газ. Конденсируясь, пары образуют аэрозоль, который оседает на поверхностях газовой системы.

Выражение для консервативной оценки скорости испарения активности выводится из уравнения Ленгмюра и закона Рауля. Один и тот же изотоп может находиться в теплоносителе и испаряться из него в нескольких химических формах. Полная скорость испарения активности i -го изотопа $Q_i^{\text{исп}}$, Бк/с, равна

$$Q_i^{\text{исп}} = 4,38 \cdot 10^{-3} a_i M_0 S \beta \sum_j \frac{P_{ij}^{\text{sat}}(T) \xi_j}{\sqrt{M_{ij} T}}, \quad (1)$$

где $Q_i^{\text{исп}}$ – количество испаряющейся активности изотопа, Бк/с; a_i – удельная активность изотопа в теплоносителе, Бк/кг; P_{ij}^{sat} – давление насыщенных паров j -й химической формы i -го изотопа, Па; T – температура, К; ξ_j – доля j -й химической формы относительно прочих химических форм данного изотопа, $\sum \xi_j = 1$; S – площадь поверхности испарения, м^2 ; M_{ij} – молекулярная масса j -го химического соединения, содержащего i -й изотоп; β – коэффициент экранировки испарения атмосферой защитного газа.

Кроме соединений со свинцом и висмутом полоний может образовывать бинарную форму – Po_2 , свойства которой отличаются от свойств элементарного полония – Po . Эйхлер проанализировал термодинамические константы, описывающие испарение полония и других халькогенов, и вывел температурную зависимость давления насыщенных паров бинарного и элементарного полония [1]. Давление насыщенных паров полония, определенное различными исследователями [2 – 5], хорошо совпадает с давлением насыщенных паров бинарного полония, рассчитанным Эйхлером, и заметно отличается от давления насыщенных паров элементарного полония. В справочнике [6] на основании сравнения результатов исследований Эйхлера, Абакумова, Брукса, Ауслендера и Бимера выдвинуто предположение, что в температурной области 298 – 1300 К в газовой фазе доминирует бинарная форма полония. Результаты экспериментов подтверждают это предположение на качественном уровне, но имеющиеся экспериментальные значения термодинамических констант недостаточно точны для вывода температурной зависимости долевого соотношения элементарного и бинарного полония.

В ТЖМТ полоний может присутствовать сразу в виде нескольких химических соединений: Po , Po_2 , PbPo и BiPo , а так как в самом ТЖМТ и на омываемых им поверхностях первого контура в определенной концентрации всегда присутствует кислород, возможно и наличие PoO_2 .

Распределение химических соединений полония в зависимости от температуры может быть оценено на основе термодинамического равновесия всех химических реакций полония в ТЖМТ, однако сегодня для этого недостаточно экспериментальных данных. Для оценки скорости выхода полониевой активности из расплава ТЖМТ используется значение эффективного давления насыщенных паров полония

$$P_i^{\text{эфф}} = P_i^{\text{sat}} \cdot \gamma \cdot X, \quad (2)$$

где P_i^{sat} – давление насыщенных паров полония; X – атомная доля полония в расплаве (растворе); γ – коэффициент термодинамической активности полония в расплаве (растворе).

Температурная зависимость давления насыщенных паров полония известна, экспериментальные данные хорошо согласуются между собой [1, 2, 4, 5, 7]. Атомную долю полония в ТЖМТ легко рассчитать, зная его активность. Коэффициент термодинамической активности полония в теплоносителе и эффективное давление паров над расплавом можно оценить, располагая экспериментальными данными о скорости выхода полония из этого теплоносителя при различных температурах.

Зависимость от температуры коэффициента термодинамической активности (КТА) в расплаве ТЖМТ выражается формулой Аррениуса $\lg(\gamma_{Po}) = A - B/T$. Следовательно, по двум точкам можно определить коэффициенты A и B .

Численное выражение такой зависимости для системы Po-Pb-Li (Po+СЛЭ) определено Фойерштайном в работе [8]:

$$\ln \gamma_{Po-Pb-Li17}(T) = -4,77 - 1329 / T ;$$

для системы Po-Pb-Bi (Po+СВЭ) это сделал Оно [9]:

$$\lg \gamma_{Po-Pb-Bi} = 1,079 - 2908 / T ;$$

для полония в расплаве висмута коэффициенты определил Джой [10]:

$$\lg \gamma_{Po-Bi} = 1,1176 - 2728,3/T .$$

Свинец оказался наименее исследованным теплоносителем в вопросе испарения содержащегося в нем полония.

В результате лабораторных исследований, проведенных в ГНЦ РФ-ФЭИ, была измерена активность ^{210}Po , испарившаяся из облученных образцов ТЖМТ за восемь часов в вакуум и в атмосферу аргона при температурах 300, 500 и 800 °С. По этим данным для каждого ТЖМТ были определены эффективное давление полония и коэффициент термодинамической активности. По измеренному количеству активности $^{210}Po - A_{исп}$, испарившейся в вакуум за время $t_{эксп}$, определена эффективная скорость испарения Q_{Po-210} , Бк/с, и массовый поток, кг/м²с:

$$Q_{Po-210} = A_{исп} / t_{эксп}; \quad G_{Po-210} = Q_{Po-210} \cdot 10^{-3} \cdot M_{PoX} / (\lambda \cdot S \cdot N_A), \quad (3)$$

где M_{PoX} – молекулярная масса испаряющегося соединения ^{210}Po , г/моль; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ мол/моль – число Авогадро; S – площадь поверхности испарения, м².

Если испарение происходит в вакуум, то эффективное давление насыщенных паров полония над расплавом равно

$$P_{Po-210}^{эфф} = \frac{G_{Po-210}}{4,38 \cdot 10^{-3} \sqrt{M_{PoX}/T}}, \quad (4)$$

где T – температура расплава, К. Если испарение происходит в газовую атмосферу, то она оказывает экранирующее действие и измеренную скорость испарения $Q_{изм}$ надо отнормировать на коэффициент экранировки β , определяемый через относительные скорости испарения в газ $v_{газ}$ и в вакуум $v_{вак}$:

$$Q_{эфф} = Q_{изм} / \beta; \quad \beta = v_{газ} / v_{вак} .$$

Относительная скорость испарения равна измеренной скорости испарения, деленной на активность образца $v = Q_{изм} / A_{исп}$. Эффективное давление насыщенных паров полония над расплавом системы X-Po равно $P_{Po}^{эфф}(T) = P_{Po}^{sat}(T) \cdot \gamma_{Po/X}(T) \cdot X_{Po}$. Зная давление насыщенных паров полония $P_{Po}^{sat}(T)$ и определив через исходную активность образца атомную долю полония в расплаве X-Po, можно получить коэффициент его термодинамической активности. Выполнив подобные измерения и расчеты для нескольких температур, можно получить выражение температурной зависимости КТА.

Для экспериментов со свинцом при $T = 300$ °С значения эффективной скорости испарения и КТА оказались завышенными, что противоречит физике процесса испарения. Следует иметь в виду, что в этом случае образцы находились в твердом состоянии, температура плавления свинца равна 327 °С. Анализ данных по испарению полония [6] показывает, что наибольшее расхождение с ленгмюровским испарением наблюдается в экспериментах при низких температурах. Определенные разными авторами значения P^{sat} полония в области температур 300 – 400 °С различаются в разы. Поэтому результаты, полученные при $T = 300$ °С, были исключены из рассмотрения.

Полученные из экспериментальных данных ФЭИ выражения для КТА полония

$$\text{в свинце} \quad \lg(\gamma_{Po/Pb}) = -0,0946 - 2401 / T;$$

$$\text{в СВЭ} \quad \lg(\gamma_{Po/Pb-Bi}) = 0,788 - 2568 / T;$$

$$\text{в СЛЭ} \quad \lg(\gamma_{Po/Pb-Li}) = 3,062 - 5299 / T.$$

Достоверность экспериментальных данных и выполненных по ним оценок подтверждается сравнением с результатами других исследователей. В России и за рубежом эксперименты по испарению полония выполнялись со свинцово-литиевой и (наиболее часто) свинцово-висмутовой эвтектикой. На рисунке 1 показаны отнормированные на атомную долю значения $P^{эфф}$ полония над СВЭ, вычисленные по данным ФЭИ и полученные ранее другими исследователями.

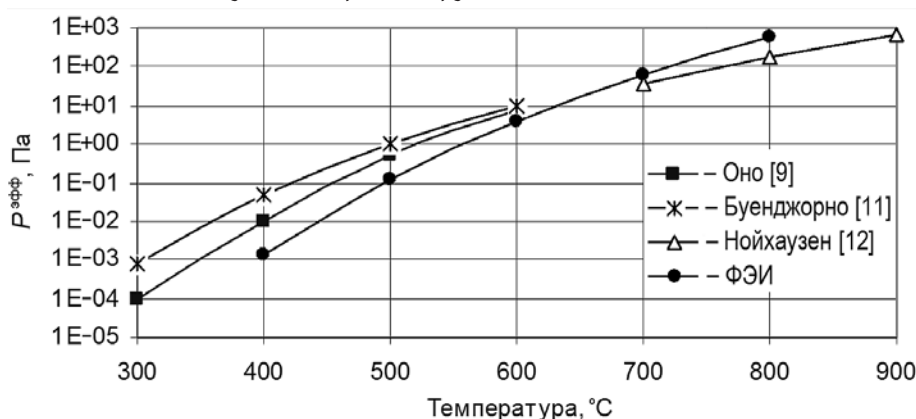


Рис. 1. Эффективное давление полония в свинцово-висмутовой эвтектике, отнормированное на атомную долю

Сравнение температурных зависимостей КТА полония в свинцово-висмутовой эвтектике, выведенной Оно [9], и полученной из экспериментальных данных ФЭИ, представлено на рис. 2. Можно отметить хорошую сходимость результатов.

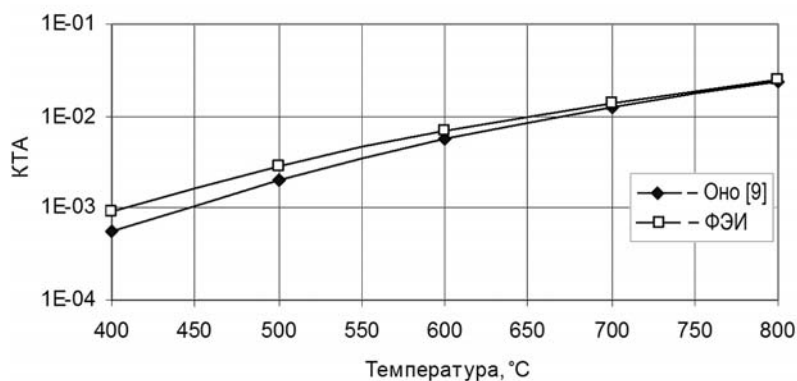


Рис. 2. Температурная зависимость КТА полония в свинцово-висмутовой эвтектике

Сравнение значений эффективного давления полония в СЛЭ, полученного Фойерштайном [8] и определенного из экспериментальных данных ФЭИ, показано на рис. 3. В области температур ниже 500 °С наблюдается значительное расхождение.

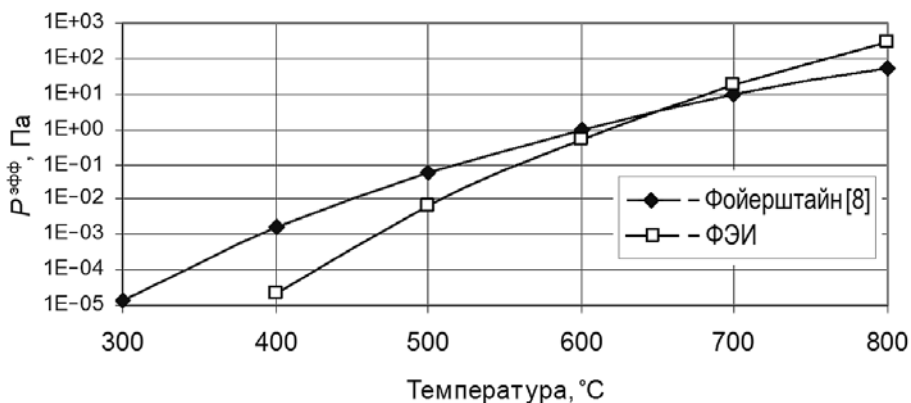


Рис. 3. Эффективное давление насыщенных паров полония над свинцово-литиевой эвтектикой, отнормированное на атомную долю полония

Точность экспериментов, выполненных в ГНЦ РФ-ФЭИ, можно считать удовлетворительной, поскольку наблюдается хорошая сходимость значений $P^{эфф}$ (Po/Pb-Bi) с результатами других исследователей. На рисунке 4 показаны значения $P^{эфф}$ полония в ТЖМТ, вычисленные по данным ФЭИ.

В области температур 600 – 800 °С для всех ТЖМТ величины эффективного давления полония близки, различия между ними находятся в пределах одного порядка. Расхождение растет с понижением температуры, но это объясняется увеличением ошибки измерений в этой температурной области, что было отмечено в анализе экспериментов по выходу полония из ТЖМТ [6]. Значения $P^{эфф}$ (Po/Pb) близки к величинам эффективного давления полония в свинцовых эвтектиках, ошибка измерений для каждого ТЖМТ примерно одинакова.

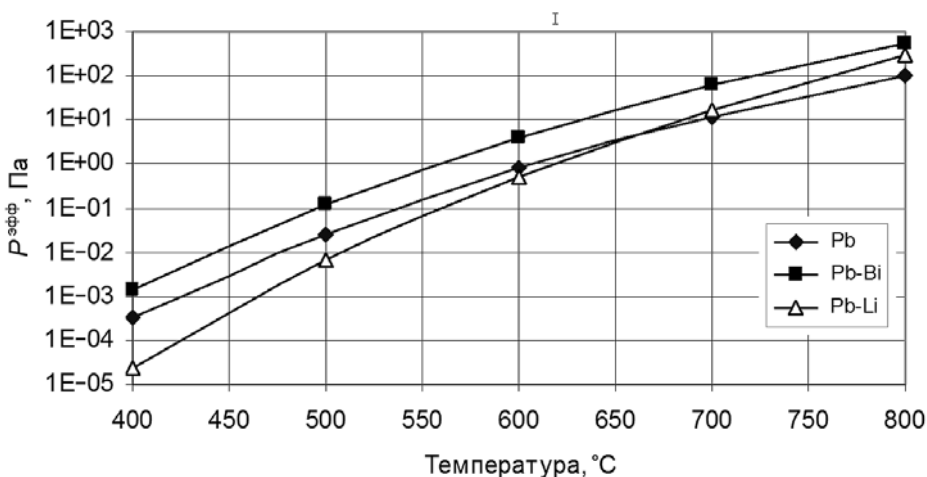


Рис. 4. Эффективное давление насыщенных паров Po над ТЖМТ, определенное по данным ФЭИ и отнормированное на атомную долю полония в расплаве

Значения эффективного давления и КТА полония в свинце, определенные по экспериментальным данным ФЭИ, можно использовать для расчета активности ^{210}Po в рабочих средах первого контура РУ со свинцовым теплоносителем.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ экспериментальных данных ФЭИ по определению скорости выхода ^{210}Po из ТЖМТ, в том числе из свинца. Сравнение характеристик выхода ^{210}Po из свинцово-висмутовой и свинцово-литиевой эвтектик, полученных в ФЭИ, с результатами других исследователей подтверждает достоверность результатов экспериментов, выполненных в ФЭИ в 1995 г.

2. На основании анализа экспериментальных данных выведена формула температурной зависимости коэффициента термодинамической активности полония в свинце

$$\lg (\gamma_{\text{Po/Pb}}) = -0,0946 - 2401 / T.$$

В связи с относительно небольшим объемом имеющихся экспериментальных данных по испарению ^{210}Po из свинца целесообразно провести дополнительные исследования.

3. В области температур 500 – 800 °С можно отметить хорошую сходимость значений эффективного давления полония в СВЭ, полученных различными исследователями.

4. Измеренная скорость испарения полония из всех рассмотренных ТЖМТ при температурах 300 – 400 °С заметно превышает расчетную. Для объяснения этого эффекта необходимо отдельное исследование.

Литература

1. *Eichler B.* Die Flüchtigkeitseigenschaften des Poloniums, PSI-Report Nr. 02-12, June 2002, ISSN 1019-0643.
2. *Абакумов А.С., Ершова З.В.* Измерение давления насыщенных паров полония. // Советская радиохимия. – 1974. – № 6. – С. 396–397.
3. *Brooks L.S.* The Vapour Pressure of Polonium, J. Am. Chem. Soc., Vol. 77, p. 3211.
4. *Ausländer J.S., Georgescu I.I.* Proceeding of the I-st Int. Conf. Peacefull Using Atomic Energy, Geneva, 1955, Vol. 7, p. 389.
5. *Beamer W.H., Maxwell C.R.* J. Chem. Phys., 1946, Vol. 14, p.569.
6. Интернет-ресурс: Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Material Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, chapter 5, p. 182. <http://www.oecd-neo.org/science/reports/2007/nea6195-handbook.html>
7. Физические величины. Справочник. / Под ред. И.С. Григорьева, Э.С. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат. 1991. – 257 с.
8. *Feuerstein H., Oshinski J., Horn S.* Behavior of Po-210 in molten Pb-17Li / JNM 191-194 (1992), pp. 288–291.
9. *Ohno S., Kurata Y., Miyhara S., Katsura R., Yoshida S.* Equilibrium Evaporation Behavior of Polonium and Its Homologue Tellurium in Liquid Lead-Bismuth Eutectic // Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 43, no.11, pp.1359–1369, 2006.
10. *Joy E.F.* The Vapour Liquid Equilibrium of Dilute Solutions of Polonium in Liquid Bismuth, Report MLM-987, Mound Laboratory, Miamisburg, Ohio, 1963.
11. *Buongiorno J., Larson J., Czerwinsky K.R.* Speciation of Polonium Released from Molten Lead Bismuth, Radiochim. Acta, 2003, Vol. 91, pp. 153–158.
12. *Neuhausen J., Kuster U., Eichler B.* Investigation of Evaporation Characteristics of Polonium and its Lighter Homologues Selenium and Tellurium from Liquid Pb-Bi-eutecticum, Radiochim. Acta, 2004, Vol. 92, pp. 917–923.

Поступила в редакцию 07.11.2013 г.

Авторы

Гончар Наталья Ивановна, старший научный сотрудник Института ядерных реакторов и теплофизики, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ»,
E-mail: nigon@ippe.ru

Панкратов Дмитрий Владимирович, главный научный сотрудник Института специальных систем, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук, профессор.

DEFINING PARAMETERS OF POLONIUM RELEASE FROM HLMC INTO GAS DERIVED FROM IPPE EXPERIMENTAL DATA

Gonchar N.I., Pankratov D.V.

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk, Kaluga reg., Russia

ABSTRACT

Heavy liquid metal coolant (HLMC) containing lead and bismuth form alpha-active isotopes: ^{210}Po , ^{209}Po and $^{210\text{m}}\text{Bi}$. ^{210}Po is the most radiotoxic one. There is no significant radiation danger in normal operation until the primary coolant circuit is pressure-tight. However, when designing the reactor gas system and refueling system polonium radiotoxicity and alpha-activity presence in the coolant should be considered.

It should be also taken into account that accidents, accompanied by the first circuit coolant leakage or significant depressurization of the gas system may result in formation of alpha-active aerosols in the air and highly radioactive surface contamination upon their precipitation.

Polonium-210 has insignificant gamma radiation and is not dangerous as an external radiation source. The most dangerous case of organism exposure is caused by polonium intake into organism through food, water and inhalation. Contact of polonium with skin and mucous tunics is also dangerous. For this reason while simulating polonium activity migration and developing staff-protection means there is a need to pay special attention to aerosols and gaseous polonium compound – PoH_2 , obtained as result of PbPo and water vapor interaction.

To substantiate radiation safety and forecast the aftermath of such accidents is essential to develop a model of polonium activity migration through the first circuit in normal operation and under conditions resulting in accidents. The model must be tested by experimental data.

Polonium activity release from HLMC into gas is the main element of this model. Most of the researches of polonium evaporation from smelted HLMC into gas or vacuum were made with lead-bismuth and lead-lithium eutectics. Polonium release from lead is studied to a lesser degree.

An experimental study on polonium evaporation from HLMC into vacuum and into argon atmosphere at 300, 500 and 800 °C was performed at IPPE in 1995. The polonium evaporation rate from lead, lead-bismuth and lead-lithium eutectics was measured. The values of effective vapour pressure of polonium in HLMC solution and thermodynamic activity coefficient for polonium in HLMC are presented in the paper. These values were calculated on the basis of experimental data. The calculation results are compared with data on polonium release from liquid metals obtained by different authors.

Key words: polonium, evaporation, heavy liquid metal coolant, effective vapour pressure, thermodynamic activity coefficient

REFERENCES

1. Eichler B. Die Flüchtigkeitseigenschaften des Poloniums, PSI-Report Nr. 02-12, June 2002, ISSN 1019–0643.
2. Abakumov A.S., Ershova Z.V. Izmerenie davleniya nasyschennyh parov poloniya [Measurement of the saturated vapor pressure of polonium]. *Sovetskaya radiohimiya*. 1974, no. 6, pp. 396–397.
3. Brooks L.S. The Vapor Pressure of Polonium. *J. Am. Chem. Soc.* vol. 77, p. 3211.

4. Ausl nder J.S., Georgescu I.I. Proceeding of the I-st Int. Conf. Peacefull Using Atomic Energy, Geneva, 1955, vol. 7, p. 389.
5. Beamer W.H., Maxwell C.R. *J. Chem. Phys.* 1946, vol. 14, p.569.
6. Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Material Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, chapter 5, p. 182. Available at: <http://www.oecd-nea.org/science/re-ports/2007/nea6195-handbook.html>
7. Grigor'ev I.S., Mejlilov E.Z. eds. *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* [The physical quantities. Handbook]. Moskow, Energoatomizdat Publ. 1991, 257 p.
8. Feuerstein H., Oshinski J. and Horn S. Behavior of Po-210 in molten Pb-17Li / JNM 191-194 (1992), pp. 288–291.
9. Ohno S., Kurata Y., Miyhara S., Katsura R., Yoshida S. Equilibrium Evaporation Behavior of Polonium and Its Homologue Tellurium in Liquid Lead-Bismuth Eutectic. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2006, vol. 43, no. 11, pp. 1359–1369.
10. Joy E.F. The Vapour Liquid Equilibrium of Dilute Solutions of Polonium in Liquid Bismuth, Report MLM-987, Mound Laboratory, Miamisburg, Ohio, 1963.
11. Buongiorno J., Larson J., Czerwinsky K.R. Speciation of Polonium Released from Molten Lead Bismuth. *Radiochim. Acta*. 2003, vol. 91, pp. 153–158.
12. Neuhausen J., K ster U., Eichler B. Investigation of Evaporation Characteristics of Polonium and its Lighter Homologues Selenium and Tellurium from Liquid Pb-Bi-eutecticum. *Radiochim. Acta*. 2004, vol. 92, pp. 917–923.

Authors

Gonchar Natal'ya Ivanovna, Senior Researcher, Institute for Nuclear Reactors and Thermophysic, FSUE «SSC RF-IPPE».

E-mail: nigon@ippe.ru

Pankratov Dmitrij Vladimirovich, Chief Researcher, Institute for Special Systems, FSUE «SSC RF-IPPE». Dr. Sci. (Engineering), Professor.