

# АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ГАЛЛИЯ И ЕГО СПЛАВОВ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

**В.С. Окунев**

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва*



На основе анализа физико-химических свойств, проблемы совместимости с конструкционными материалами, внутренней самозащищенности РУ исследуется возможность применения галлия и сплавов Na-Ga-Pb (с различным содержанием компонентов) в качестве теплоносителей реакторов на быстрых нейтронах.

## ВВЕДЕНИЕ

В преддверии широкомасштабного развития ядерной энергетики становится актуальной проблема поиска новых конструкторских решений, новых материалов ядерной техники, анализируются возможности расширения спектра использования ядерной энергии для реализации задач XXI столетия. По мере расширения сферы применимости РУ, иначе говоря, их целевого назначения, вновь стал актуальным выбор оптимальных теплоносителей ядерных реакторов, в том числе на быстрых нейтронах (БР). Сегодня практически ни у кого не вызывает сомнения, что оптимальным теплоносителем энергетических БР, на которых будет базироваться широкомасштабная безопасная ядерная энергетика будущего, является жидкий свинец [1].

В качестве возможного теплоносителя БР, например, для производства высокопотенциального тепла может рассматриваться свинец, галлий [2] и сплавы на их основе. Галлий и его сплавы предпочтительны вследствие низкой химической активности (в частности, высокой стойкости на воздухе), широкого диапазона рабочих температур при высокой температуре кипения [3-5], неактивируемости в активной зоне. Галлий характеризуется самым большим температурным диапазоном существования в жидком состоянии по сравнению со всеми другими химическими элементами: 302,9...2478 К [4] (температура кипения галлия настолько высока, что этим преимуществом в энергетических РУ трудно воспользоваться). Галлий образует сплавы со щелочными и тяжелыми металлами (Na-Ga-Pb и др.) [6], в том числе смешанные расплавы со свинцом, висмутом и ртутью [3]. По теплофизическим свойствам галлий занимает промежуточное положение между натрием и свинцом. Формально галлий относится к тяжелым металлам, хотя его плотность ( $6,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) значительно меньше плотности свинца ( $10,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>). В отличие от свинца чистый галлий почти не токсичен [5].

Необходимо отметить, что галлий более распространен в земной коре, чем свинец (распространенность галлия  $1,8 \cdot 10^{-3}$  %, свинца  $1,4 \cdot 10^{-3}$  %) [4]. Масштаб производства

галлия мал (в мире добывают около 30 т/год [4]), что обусловлено незначительными потребностями (97 % галлия используется для изготовления полупроводниковых материалов). Ничто не препятствует увеличению производства галлия.

При использовании галлиевого теплоносителя можно ожидать высокой термодинамической эффективности паросилового цикла и повышения самозащищенности от аварийных режимов, сопровождающихся отказом аварийной защиты (известных в зарубежной литературе под аббревиатурой «ATWS»): LOF WS - «нарушение (прекращение) принудительной циркуляции теплоносителя» (в эту группу обычно объединяют аварийные режимы, инициированные уменьшением расхода теплоносителя через активную зону реактора), LOHS WS - «нарушение теплоотвоода от первого контура» (аварийные ситуации, вызванные повышением температуры теплоносителя на входе в активную зону), TOP WS - «аварийный режим с увеличением мощности» (например, в результате ввода ограниченной величины положительной реактивности), OVC WS - «переохлаждение теплоносителя первого контура» (обычно рассматривают два независимых события, инициирующие этот режим: перевод главных циркуляционных насосов (ГЦН) на повышенную производительность или подключение резервной «холодной» петли [7]) и их комбинаций. Эти ситуации считаются наиболее опасными для БР с жидкометаллическим теплоносителем [7].

Несмотря на все эти достоинства ни галлий, ни его сплавы никогда не использовались для охлаждения РУ.

Во-первых, в этом не было необходимости, т.к. вода и жидкий натрий позволяли решать все (или почти все) проблемы, стоящие перед человечеством и ядерной энергетикой во второй половине XX века (при небольшой доле ядерных реакторов в структуре энергетики мира и нашей страны). Они справедливо считались и до сих пор считаются оптимальными теплоносителями ЯЭУ. Технология таких теплоносителей хорошо отработана.

Во-вторых, использование новых теплоносителей требует решения новых проблем и развития новых технологий, что должно иметь серьезное обоснование. Проблемы связаны с отсутствием экспериментальных данных и высокой степенью неопределенности свойств новых для реакторной техники материалов, совместимостью компонентов различных сплавов (особенно если они принадлежат к разным группам термодинамического подобия), совместимостью с конструкционными материалами (в том числе трудностями в решении проблемы коррозии) и др.

Применимость теплоносителей на основе галлия и его сплавов определяется их физико-химическими свойствами, возможностью обеспечения безопасности РУ. Проблемы связаны с несовместимостью с конструкционными материалами БР, плохой самозащищенностью от аварий с потерей теплоносителя (LOCA).

## **НЕДОСТАТКИ ГАЛЛИЯ КАК ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Авторами [3, 8, 9] отмечается, что использованию галлия препятствует высокая коррозионная активность по отношению к реакторным сталям. Большинство реакторных сталей и сплавов разрушаются жидким галлием [10]. Хорошо совместимы со сплавами галлия и свинца конструкционные стали на основе вольфрама и молибдена [2,3,9]. Авторами работы [2] в качестве конструкционных сталей в БР с жидкометаллическим топливом и галлиевым теплоносителем предлагается использовать вольфрам или сплавы на его основе. Вольфрам - один из наиболее тугоплавких элементов. По температуре плавления (3693 К) он уступает лишь графиту. Вольфрам - компонент жаропрочных сверхтвердых сталей и сплавов. В реакторных материалах вольфрам предлагалось использовать в небольших количествах (0,5%) в качестве легирующей добавки, улучша-

ющей механические свойства сталей при высоких температурах [9]. Сплавы на основе тугоплавких металлов (W, Mo, Cr) рассматриваются в качестве конструкционных материалов реакторов типа HTGR или РУ космических аппаратов. Максимальная рабочая температура таких сплавов 1368 К [9]. Вольфрам - сильный поглотитель нейтронов, что ограничивает его использование. Конструкционные стали БР не содержат вольфрама. Авторами [2] со ссылкой на [11, 12] отмечается возможность длительной работы (по крайней мере, 2,3 года при температурах галлиевого теплоносителя 1700-1900 К, расходе 3376 кг/с, средней линейной нагрузке 1,0 кВт/см) сплавов вольфрама в БР, подтвержденная экспериментально.

Таким образом, решение проблемы коррозии, если галлий будет использован в качестве теплоносителя серийных энергетических РУ (пока в этом нет необходимости, широкомасштабная ядерная энергетика обозримого будущего ориентируется на свинцовоохлаждаемые БР), возможно, потребует поиска новых конструкционных материалов и/или применения других известных способов снижения коррозионной активности в рамках существующих или новых технологий.

Один из основных недостатков теплоносителей на основе галлия — высокое сечение поглощения нейтронов и, следовательно, большой положительный пустотный эффект реактивности (ПЭР), особенно при осушении центральной части активной зоны реактора. Кроме того, конструкционные стали, с которыми хорошо совместим галлий, также имеют высокое сечение поглощения нейтронов.

Применение галлия может привести к образованию радиоактивного  $^{72}\text{Ga}$ , продукт распада которого -  $^{72}\text{Ge}$  (температура плавления 1229 К) может осаждаться на поверхности твэлов и конструкционных сталей. При использовании в качестве конструкционных материалов тугоплавких сталей на основе молибдена (совместимых с галлиевым теплоносителем) будет образовываться радиоактивный изотоп  $^{93}\text{Mo}$ , определяющий длительную наведенную активность.

Перечисленные недостатки ограничивают область применимости РУ, охлаждаемых галлием. Например, из-за положительного ПЭР (который увеличивается по мере перехода к реакторам большой мощности) практически невозможно детерминистически исключить аварии, вызванные потерей теплоносителя, следовательно, галлий нецелесообразно использовать для охлаждения больших энергетических БР при их массовом строительстве. (Проблема коррозии - вопрос важный, но по отношению к безопасности - вторичный).

Возможная ниша для использования теплоносителей на основе галлия - космические РУ, высокотемпературные реакторы для производства водорода или жидкого топлива из угля и др. Авторами [2] предлагается использовать галлий для охлаждения высокотемпературного БР малой мощности (280 МВт /т/) с жидким топливом, что позволит достичь высокой энергонапряженности активной зоны (при средней линейной тепловой нагрузке более 1 кВт/см). Диапазон рабочих температур теплоносителя в таком реакторе - 1700-1900 К (границы диапазона соответствуют температуре на входе и выходе активной зоны).

Использование галлия в БР - своеобразный компромисс (с точки зрения выбора оптимальных теплофизических свойств) между легким натрием с относительно низкой температурой кипения, обладающим высокой теплоемкостью и теплопроводностью, и тяжелым свинцом с высокими температурами кипения и замерзания, теплоемкость и теплопроводность которого существенно ниже, чем у натрия. В сплавах Na-Ga-Pb невысокая температура кипения натрия может быть в определенной мере компенсирована высокой температурой кипения галлия и свинца, высокая температура замерзания свинца - низкой у галлия и относительно небольшой у натрия.

## ВОЗМОЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ САМОЗАЩИЩЕННОСТИ

На примере традиционной компоновки быстрого бридера, содержащей две активные зоны (малого и большого обогащения: ЗМО, ЗБО соответственно) с топливом UN-PuN разного обогащения по  $^{235}\text{U}$ , окруженных воспроизводящими экранами, проиллюстрируем возможность обеспечения внутренней самозащищенности при использовании теплоносителей на основе галлия.

В табл. 1 приведены основные характеристики компоновки и функционалы, характеризующие номинальный режим работы БР тепловой мощностью 2100 МВт с теплоносителями на основе галлия и его сплавов. Значения основных функционалов, характеризующих внутреннюю самозащищенность реактора, для этих компоновок приведены в табл. 2. Компоновки получены заменой натрия в РУ типа БН-800 галлием или сплавом Na-Ga-Pb с соответствующей коррекцией параметров компоновки (вектора управления). Расчетные исследования проводились с помощью программ DRACON-M и FRISS-2D [13].

Замена натрия галлием приводит к снижению эффективного коэффициента размножения нейтронов до 0,87 (т.к. галлий сильнее поглощает нейтроны). Для выполнения условия критичности потребовалось уменьшить долю стали в активной зоне и увеличить долю топлива. Это может быть реализовано за счет повышения диаметра топливной таблетки твэлов (по сравнению с РУ типа БН), минимизации шага решетки твэлов и перехода к бесчехловым ТВС (по аналогии с РУ типа БРЕСТ) или сборкам с перфорированными чехлами. Однако при фиксированных размерах активной зоны и экранов не удастся достичь условия критичности при ограничениях для температуры оболочек твэлов в номинальном режиме работы реактора. Повышение доли топлива и уменьшение стали в активной зоне приводит к увеличению температуры топлива и оболочек, причем максимальная температура оболочек твэлов превышает допустимое значение - 900 К для номинального режима (такая относительно низкая для жаропрочных сталей температура, как и ограничения для размеров активной зоны, были выбраны для удобства сравнения полученных компоновок с традиционными БР). Таким образом, для выполнения температурных ограничений потребовалось снижение энергонапряженности активной зоны - увеличение объема (размеров) активной зоны. При ограничениях на размеры компоновки (активной зоны и экранов) это возможно за счет уменьшения толщины экранов. Причем уменьшение толщины бокового экрана при увеличении радиуса активной зоны выгодно с точки зрения снижения ПЭР, поэтому в число управлений задачи наряду с радиальными размерами зон была включена толщина бокового экрана. Все компоновки совместимы по размерам ( $\Sigma \Delta R_i = \text{const}$ ,  $\Sigma \Delta H_j = \text{const}$ , где  $\Delta R_i$  и  $\Delta H_j$  - радиальные и аксиальные размеры зон реактора).

Полученная компоновка БР с галлиевым охлаждением характеризуется отрицательным ПЭР при осушении реактора и внутренней самозащищенностью от ряда наиболее опасных аварийных ситуаций из числа ATWS и их комбинаций (табл. 2).

При моделировании аварийной ситуации LOF WS предполагалось одновременное обесточивание всех ГЦН. Наличие высокоинерционных маховиков обеспечивает «выбег» насосов в течение времени  $t_n$ . При этом расход теплоносителя снижается по гиперболическому закону от времени до уровня, определяемого естественной циркуляцией теплоносителя по первому контуру. Ситуация LOHS WS инициирована отказом насосов второго контура. Для консервативной оценки внутренней самозащищенности предполагается, что на вход в активную зону поступает теплоноситель, нагретый до температуры выхода. Через определенное время (определяющееся временем транспорта теплоносителя по первому контуру) ситуация повторяется. Таким образом, происходит ступенчатое повышение температуры на входе. При отрицательном коэффициенте реактивности по температуре теплоносителя высота этих периодических

Таблица 1

**Параметры компоновки и некоторые функционалы, характеризующие номинальный режим работы БР, охлаждаемых галлием и сплавами Na-Ga-Pb**

| Параметр  | Теплоноситель         |                        |                        |                       |
|---|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
|   | Ga                    | Na-Ga-Pb               |                        |                       |
|   |                       | вариант 1              | вариант 2              | вариант 3             |
| Массовое соотношение компонентов теплоносителя Na : Ga : Pb     | 0:1:0                 | 1:1:1                  | 2:1:1                  | 1:2:1                 |
| <b>Управления:</b>  |                       |                        |                        |                       |
| Обогащение топлива, %   | 13,5 / 13,9           | 11,0 / 16,1            | 5,5 / 16,7             | 12,9 / 14,8           |
| Диаметр топливной таблетки, мм                                  | 9,45                  | 8,42                   | 7,29                   | 8,83                  |
| Относительный шаг решетки твэлов                                | 1,150                 | 1,195                  | 1,150/1,161            | 1,177                 |
| Размер зон, см  |                       |                        |                        |                       |
| радиальный  | 83,0 / 85,9<br>/ 20,6 | 101,9 / 42,6 /<br>45,0 | 102,3 / 42,2 /<br>31,2 | 95,4 / 48,1<br>/ 45,0 |
| аксиальный (полувысота активной зоны / экран)                   |                       | 51,0 / 45,0            |                        |                       |
| Массовый расход теплоносителя, кг / (м <sup>2</sup> с)          | 21277 / 15652         | 13797 / 15502          | 11206 / 18094          | 13318 / 15257         |
| <b>Функционалы:</b>   |                       |                        |                        |                       |
| Максимальная температура, К топлива                             | 1402 / 1414           | 1441 / 1800            | 1049 / 1800            | 1548 / 1644           |
| теплоносителя   | 792 / 840             | 788 / 834              | 742 / 819              | 830 / 826             |
| оболочки твэла  | 833 / 867             | 823 / 887              | 755 / 871              | 868 / 871             |
| Средний подогрев теплоносителя, К                               | 165                   | 165                    | 157                    | 172                   |
| Максимальная линейная нагрузка на твэлы, Вт/см                  | 552,3 / 536,0         | 544,7 / 807,2          | 240,6 / 731,7          | 619,5 / 696,4         |
| КВА   |                       | 1,06                   |                        |                       |
| Доля естественной циркуляции, %                                 | 9,22/14,82/<br>5,03   | 9,44/9,79/<br>4,40     | 6,46/5,71/<br>3,81     | 11,01/9,47/<br>4,41   |
| Коэффициент реактивности, 10 <sup>6</sup> (Δk/k)/K доплеровский | -1,056/<br>-2,131     | -2,056/<br>-3,436      | -1,326/<br>-4,340      | -2,479/<br>-2,513     |
| плотностной   | 7,982/<br>11,130      | 3,200/<br>7,515        | -2,883/<br>4,668       | 8,466/<br>8,210       |

Примечание: в табл.1, 2 через черту приведены значения, соответствующие ЗМО и ЗБО

скачков температуры на входе уменьшается со временем. Процесс TOP WS инициирован вводом ограниченной величины положительной реактивности. Для определенности рассматривается ввод реактивности  $0,9 \beta$  ( $\beta$  - эффективная доля запаздывающих нейтронов) за 10 с по линейному закону от времени. Аварийный режим OVC WS может быть вызван увеличением расхода или уменьшением температуры теплоносителя на входе в активную зону. В расчетах предполагалось увеличение расхода в 1,2 раза за 10 с (соответствует переводу насосов на повышенную производительность) и снижение температуры теплоносителя на входе в активную зону на 30 К за 10 с (подключение «холодной» резервной петли) по линейному закону от времени.

Таблица 2

Функционалы, характеризующие аварийные режимы, сопровождающиеся отказом аварийной защиты

| Функционал  | Теплоноситель            |           |           |           |
|---|--------------------------|-----------|-----------|-----------|
|   | Ga                       | Na-Ga-Pb  |           |           |
|   |                          | вариант 1 | вариант 2 | вариант 3 |
| Массовое соотношение компонентов теплоносителя Na : Ga : Pb                           | 0:1:0                    | 1:1:1     | 2:1:1     | 1:2:1     |
| <b>LOCA WS (потеря теплоносителя)</b>   |                          |           |           |           |
| ПЭР при осушении, % ? k / k:  |                          |           |           |           |
| реактора  | –1,621                   | –0,642    | 0,355     | –1,342    |
| центральной зоны  | 15,391                   | 7,041     | 3,254     | 11,435    |
| <b>LOF WS (прекращение принудительной циркуляции в 1 контуре)</b>                     |                          |           |           |           |
| Переходный режим (К):   |                          |           |           |           |
| $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$ при $t_{\text{н}}=30$ с                                  | 1088/1010                | 1006/1108 | 866/1121  | 1091/1150 |
| $t_{\text{н}}=40$ с   | 1070/996                 | 994/1093  | 860/1091  | 1077/1135 |
| Установившийся режим:   |                          |           |           |           |
| $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$ , К  | 1035/964                 | 975/1063  | 838/1034  | 1050/1106 |
| $T_{\text{топ}}^{\text{max}}$ , К   | 1147/1085                | 1144/1180 | 858/1120  | 1171/1252 |
| относительная мощность  | 0,248                    | 0,221     | 0,130     | 0,245     |
| <b>TOP WS (ввод реактивности 0,9 β)</b>   |                          |           |           |           |
| Переходный режим:   |                          |           |           |           |
| $T_{\text{топ}}^{\text{max}}$ , К   | 1641/1668                | 1611/2059 | 1146/2065 | 1741/1854 |
| относительная мощность  | 1,302                    | 1,205     | 1,231     | 1,210     |
| Установившийся режим:   |                          |           |           |           |
| $T_{\text{топ}}^{\text{max}}$ , К   | 1612/1643                | 1593/2032 | 1141/2043 | 1719/1829 |
| $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$ , К  | 824/883                  | 808/861   | 759/848   | 856/852   |
| относительная мощность  | 1,254                    | 1,176     | 1,207     | 1,178     |
| <b>OVC WS (переохлаждение теплоносителя 1 контура)</b>                                |                          |           |           |           |
| <b>а) Перевод насосов на повышенную производительность</b>                            |                          |           |           |           |
| $T_{\text{топ}}^{\text{max}}$ , К   | 1534/1539                | 1570/2007 | 1119/2030 | 1662/1776 |
| Относительная мощность  | 1,247                    | 1,232     | 1,270     | 1,211     |
| <b>б) Подключение резервной петли</b>   |                          |           |           |           |
| $T_{\text{топ}}^{\text{max}}$ , К   | 1574/1605                | 1589/2039 | 1138/2088 | 1696/1807 |
| Относительная мощность  | 1,244                    | 1,208     | 1,271     | 1,186     |
| <b>LOHS WS (прекращение теплоотвода ко 2 контуру)</b>                                 |                          |           |           |           |
| $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$ , К  | 861/871                  | 847/877   | 808/851   | 888/886   |
| <b>Наложение процессов LOF WS, TOP WS и OVC WS (б)</b>                                |                          |           |           |           |
| Локальный (глобальный) максимум $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$ (К) в переходном режиме: |                          |           |           |           |
| при $t = t_{\text{н}} = 30$ с   | 1453/1414 <sup>(1)</sup> | 1061/1180 | 900/1197  | 1161/1229 |
| при $t = t_{\text{н}} = 40$ с   | 1471/1435                | 1054/1166 | 896/1168  | 1148/1216 |
| Установившийся режим:   |                          |           |           |           |
| $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$ , К  | 1201/1096                | 1065/1187 | 899/1184  | 1160/1234 |
| $T_{\text{топ}}^{\text{max}}$ , К   | 1369/1276                | 1295/1346 | 930/1308  | 1321/1429 |
| относительная мощность  | 0,370                    | 0,300     | 0,189     | 0,327     |

Примечание: <sup>(1)</sup> соответствует номинальному режиму

Каждый аварийный режим описывается несколькими функционалами (температуры компонентов активной зоны, мощность и др.). Основным критерием для оценки безопасности было условие выполнения ограничений для этих функционалов. Рассматриваются две группы ограничений для таких функционалов: одна соответствует переходному процессу, другая - режиму, установившемуся в результате действия обратных реактивных связей. (Установившиеся режимы существуют для всех рассмотренных аварийных ситуаций. Внутренняя самозащищенность не может быть обеспечена только в процессе LOCA WS при осушении центральной зоны реактора - ЗМО.)

Большой положительный ПЭР реализуется при осушении центральной части активной зоны. Это связано с сильным поглощением нейтронов галлием (по сравнению с натрием и свинцом). Микросечение поглощения нейтронов галлием при энергии нейтронов 0,1 МэВ равно  $9,1 \cdot 10^{-2}$  б (например, для свинца  $2,1 \cdot 10^{-3}$  б), при 1 МэВ -  $2,5 \cdot 10^{-2}$  б (для свинца  $3,1 \cdot 10^{-3}$  б) и уменьшается при дальнейшем увеличении энергии [14]. Таким образом, преимущества галлия наиболее ярко проявляются при жестком спектре нейтронов в реакторе.

Следует отметить, что ПЭР в БР с галлием не может реализоваться в результате кипения теплоносителя (температура кипения практически не достижима), сгорания всего или части теплоносителя (галлий не горит). С другой стороны, трудно (по сравнению с РУ типа БН и БРЕСТ) исключить детерминистически потерю теплоносителя в результате его утечки из активной зоны, поскольку температура замерзания галлия ниже, чем у натрия и, тем более, свинца, и галлий может не замерзнуть в шахте реактора (как это предполагается, например, в БР со свинцовым охлаждением). Наиболее реалистичным событием, приводящим к попаданию пузырей в активную зону, может рассматриваться, например, разгерметизация трубок парогенератора при двухконтурной схеме ЯЭУ. В этом случае пузыри будут поступать не только в ЗМО, но и в ЗБО и боковые экраны, т.е. осушение только центральной части активной зоны вряд ли возможно, а осушение всего реактора неопасно - ПЭР при этом отрицателен. (Например, в РУ типа БРЕСТ для исключения вовлечения пузырей в активную зону снижают скорость теплоносителя на опускном участке тракта [8].)

Отрицательный доплеровский коэффициент реактивности наряду с отрицательным коэффициентом, связанным с расширением топлива, благоприятно влияет не только на аварийные режимы с увеличением мощности. (К таким режимам следует отнести не только TOP WS, но и OVC WS.)

Положительный плотностной коэффициент усугубляет аварии с ухудшением условий теплоотвода (LOF WS, LOHS WS). Благоприятную роль в ограничении температуры теплоносителя (и оболочек) играет запаздывающий по времени отрицательный коэффициент реактивности по радиальному расширению активной зоны (основной вклад в который дает расширение опорной плиты). Запаздывание последнего эффекта по отношению к началу аварийной ситуации определяется временем транспорта теплоносителя по первому контуру в соответствующем аварийном режиме. По истечении этого времени на вход в активную зону поступит теплоноситель с температурой, отличной от номинальной. В аварийной ситуации LOF WS время транспорта больше, чем в номинальном режиме. При малом времени  $t_n$  выбега ГЦН, по крайней мере, при  $t_n < t_I$  (где  $t_I$  - время транспорта теплоносителя по первому контуру в номинальном режиме, т.е. при 100%-расходе), время транспорта можно оценить как  $\sim t_I / G_{ЕЦ}$  ( $G_{ЕЦ}$  - отнесенный к номинальному расход теплоносителя первого контура в режиме естественной циркуляции).

Характерной особенностью развития аварийной ситуации LOF WS в полученной компоновке БР с галлиевым теплоносителем является смещение максимума

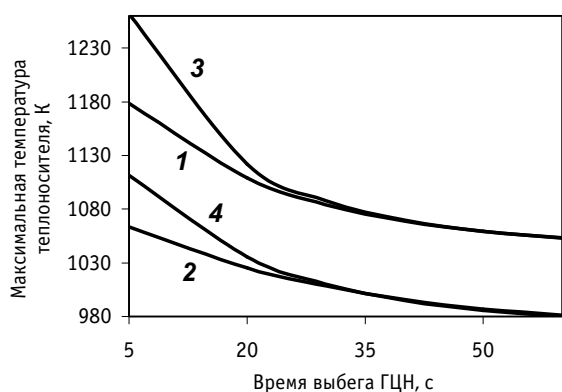


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры  $T_{\text{тн}}^{\text{max}}$  теплоносителя от времени выбега ГЦН: 1 - выход из верхнего экрана над зоной малого обогащения; 2 - выход из верхнего экрана над зоной большого обогащения; 3 - граница зоны малого обогащения и верхнего экрана; 4 - граница зоны большого обогащения и верхнего экрана.

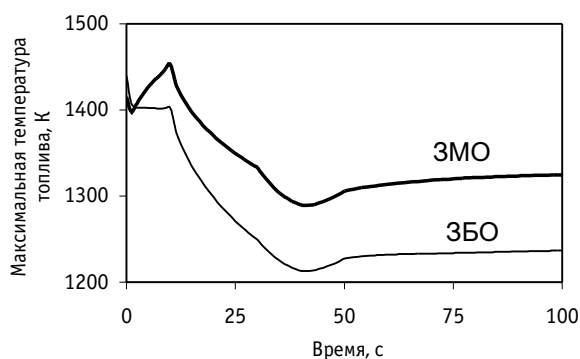


Рис. 2. Временная зависимость максимальной температуры топлива при наложении процессов (LOF+TOP+OVC) WS: 3МО - в зоне малого обогащения, 3БО - в зоне большого обогащения

выбега насосов и растет по мере увеличения  $t_n$  (см. табл. 2). Это объясняется доминированием процесса TOP над LOF при их одновременном наложении. Так в аварийной ситуации TOP WS температура топлива увеличивается со временем, а ее глобальный максимум, например, при вводе реактивности  $0,9 \beta$  соответствует установившемуся в результате действия обратных реактивных связей режиму, в процессе LOF WS - уменьшается. Причем при времени выбега  $t_n = 30$  с температура топлива во второй радиальной зоне (3БО) уменьшается со временем, в первой (3МО) - ведет себя так, как описано выше (достигает максимума в момент  $t_n$ ). При времени выбега 35 с и выше максимум температуры топлива в момент  $t_n$  наблюдается в обеих зонах реактора.

Минимизация ПЭР, который реализуется при осушении центральной зоны реактора - 3МО и экрана над ней (обозначим его ПЭР<sub>ц</sub>) до приемлемого значения (например, ПЭР<sub>ц</sub> <  $b$ ), в рамках традиционной компоновки реактора невозможна. Снижение ПЭР<sub>ц</sub> по крайней мере, в полтора - два раза возможно при замене центральной зоны реактора (зоны малого обогащения) сырьевой вставкой (при фик-

температуры теплоносителя из точки, соответствующей выходу из верхнего торцевого экрана, на границу экрана и активной зоны при времени выбега насосов  $t_n = 35...40$  с (рис. 1). Для реакторов типа БН это обычно наблюдается при меньшем времени выбега ГЦН [13].

При наложении четырех вышеперечисленных аварийных режимов возможна нейтрализация некоторых из них, поэтому наиболее опасно наложение трех событий, например, LOF WS, TOP WS и OVC WS. Причем, ситуация усугубляется, если эти события начинаются одновременно.

Одна из особенностей полученной компоновки с галлиевым теплоносителем - характер изменения максимальной температуры топлива при одновременном наложении процессов (LOF+TOP+OVC) WS (рис. 2). В отличие от БР с другими жидкометаллическими теплоносителями (в том числе с натрием) температура увеличивается в первые секунды аварийной ситуации, достигает максимума в момент  $t_n$ , затем уменьшается до некоторого квазистационарного значения, определяемого значением обратных реактивных связей. Максимум температуры  $T_{\text{топ}}^{\text{max}}$  топлива определяется временем



сированных значениях размеров зон). При этом отношение максимальных температур теплоносителя в зоне большого обогащения и внутренней зоне воспроизводства равно 1,4. Однако переход к компоновке с кольцевой активной зоной не решит проблему положительного ПЭР<sub>ц</sub>.

Кроме БР с галлием рассматривались компоновки, охлаждаемые сплавами Na-Ga-Pb с разным содержанием компонентов (табл. 1, 2). Вариант 1 соответствует соотношению массового содержания натрия, галлия и свинца 1:1:1, вариант 2 - 2:1:1, вариант 3 - 1:2:1.

Следует отметить, что по мере увеличения доли галлия в сплаве ухудшается ПЭР<sub>ц</sub>. Это связано с сильным поглощением быстрых нейтронов галлием.

В отличие от БР, охлаждаемого чистым галлием, при использовании сплавов Na-Ga-Pb глобальный максимум температуры топлива при наложении процессов (LOF + TOP + OVC) WS соответствует номинальному режиму. Все варианты компоновки БР, охлаждаемых теплоносителями на основе галлия, обладают свойством внутренней самозащищенности от аварий LOF WS, LOHS WS, TOP WS, OVC WS и их наиболее опасных комбинаций, а также приемлемым ПЭР (меньше нуля или b) при осушении всего реактора. Причем самозащищенность может быть обеспечена даже при большом (50%) содержании натрия в сплаве.

В связи с сильным поглощением нейтронов галлием ПЭР<sub>ц</sub> увеличивается с повышением доли галлия в сплаве (рис. 3).

## Выводы

В заключение отметим, что использование для охлаждения БР галлия и его сплавов приводит к большому положительному ПЭР при осушении центральной части активной зоны. Это является следствием высокого сечения поглощения нейтронов галлием. В то же время такие РУ обладают высокой внутренней самозащищенностью от наиболее опасных для БР аварийных ситуаций (в том числе их комбинаций) из числа ATWS (кроме LOCA WS). Поэтому предпочтение должно отдаваться реакторам малой мощности (положительный ПЭР является основным фактором, препятствующим увеличению мощности реактора).

Преимущества галлия для охлаждения БР наиболее ярко проявляются при переходе к высокотемпературным реакторам, при жестком спектре нейтронов и малой активной зоне.

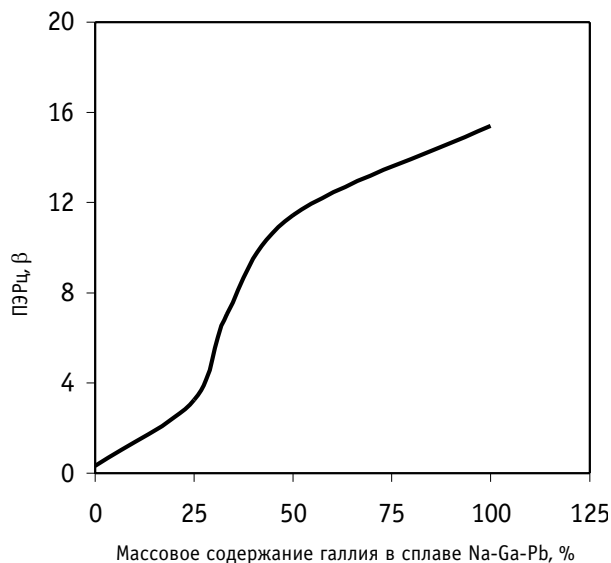


Рис. 3. Зависимость ПЭР<sub>ц</sub> от содержания галлия в сплаве Na-Ga-Pb

## Литература

1. Орлов В.В., Аврорин Е.Н., Адамов Е.О. и др. Нетрадиционные концепции АЭС с естественной безопасностью (новая ядерная технология для крупномасштабной ядерной энергетики следующего этапа)//Атомная энергия. - 1992. - Т. 72. - Вып. 4. - С. 317-329.
2. Sawada T., Netchaev A., Ninokat H., and Endo H. Gallium-Cooled Liquid-Metallic Fueled Fast Reactor//Progress in Nuclear Energy. - 2000. - V. 37. - № 1-4 (Special issue: Global Environment and Nuclear Energy System-3: Proc. of the Third Intern. Symp. GENES-3). - P. 313-319.
3. Зеликман А.Н., Крейн О.Е., Самсонов Г.В. Металлургия редких металлов. - М.: Металлургия, 1964.
4. Эмсли Дж. Элементы: Пер. с англ. - М.: Мир, 1993.
5. Физико-химические свойства элементов. Справочник/Под ред. Г.В.Самсонова. - Киев: Науко-ва думка, 1965.
6. Козин Л.Ф., Морачевский А.Г. Физико-химия и металлургия высокочистого свинца. - М.: Металлургия, 1991.
7. Wade D.C., Fujita E.K. Trends Versus Reactor Size of Passive Reactivity Shutdown and Control Performance//Nuclear Science and Engineering: 103, 122-195 (1989).
8. Орлов В.В., Леонов В.Н., Сила-Новицкий А.Г. и др. Свинцовый теплоноситель как составляющая естественной безопасности: Материалы международного семинара «Быстрый реактор и топливный цикл естественной безопасности для крупномасштабной энергетики. Топливный баланс, экономика, безопасность, отходы, нераспространение». Доклад №11. - М.: Министерство РФ по атомной энергии, 2000. - С. 1-6.
9. Ран Ф., Адамантиадес А., Кентон Дж., Браун Ч. Справочник по ядерной энерготехнологии: Пер. с англ./Под ред. В.А.Легасова. - М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Громова А.И., Кузнецова В.Н., Морозова И.К. и др. Коррозионная стойкость реакторных материалов. Справочник/Под ред. В.В. Герасимова. - М.: Атомиздат, 1966.
11. Dutt D.S. and Cox C.M. Failure Experience in Refractory Alloy-Clad Pins Applicable for Space Nuclear Power//American Nuclear Society, New Orleans, Louisiana, USA, 1984.
12. Dutt D.S. Performance Testing of Refractory Alloy-Clad Fuel Element for Space Reactors: Proc. 20-th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf. (Miami Beach, FL, USA, 1985).
13. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Использование вариационных методов для решения задач обеспечения и обоснования естественной безопасности реакторов на быстрых нейтронах. - М.: МИФИ, 1999.
14. JEF-PC. Version 2.0. O.E.C.D./NEA Data Bank. 12, Bld des Iles, 92130 Issy-Les-Moulineaux, FRANCE. 1997.

Поступила в редакцию 26.10.2001

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.311.25: 621.039.58

*Systematization of Probabilistic Analysis of NPP Fire Safety Problems \ I.B. Kuzmina, N.L. Salnikov; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 6 pages, 2 illustrations. – References, 5 titles.*

Matrix model of Probabilistic Analysis of NPP Fire Safety (PAFS) is suggested. Such presentation of PAFS researching provides comfortable and visible understanding of PAFS volume and probabilistic values. Different blocks of matrix are the complexes of the problems. Particularities of PAFS performance are considered, and also listing of general problems with their interfaces is formed.

### УДК 621.039.51: 539.1.074

*Determination low multiplying subcritical states by Rossi- $\alpha$  technique \ V.V. Doulin, I.P. Matveenko; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 9 pages, 4 tables, 4 illustrations. – References, 7 titles.*

The method of obtaining the spatial corrections at measurement of low multiplying subcritical states by Rossi- $\alpha$  technique was applied. For that solution of inhomogeneous equation adjoint with respect to detector count rate is used.

The experiment on determination of value of low multiplying subcriticality of media (3 kg  $^{239}\text{Pu}$  (95%)) was carried out. A new installation for registration Rossi – ? distribution was developed that has essentially improved accuracy of measurements.

The measurement results were analysed with using this new method and traditional method for calculation of spatial corrections using solution of homogeneous relative asymptotic power equation.

### УДК 621.039.5: 621.039.547.5

*Physical characteristics of the light-water reactor with ultra-long life of thorium-based fuel \ G.G. Koulikov, A.N. Shmelev, E.F. Kryuchkov, G.V. Tikhomirov, M.Yu. Ternovikh, V.A. Apse, M. Saito, V.V. Artisyuk; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 11 pages, 4 tables, 1 illustration. – References, 11 titles.*

Physical characteristics of the light-water reactor loaded with (Th-Pa-U)-fuel are analysed. It is demonstrated that introduction of  $^{231}\text{Pa}$  into Th-based fuel composition opens a possibility of principle to reach ultra-long life-time of fuel due to stabilization of its multiplying properties during the reactor operation.

### УДК 621.039.53: 621.039.526

*Analysis of Applicability of the Gallium and its Alloys for Cooling of LMFR \ V.S. Okunev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 10 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 14 titles.*

The possibilities of applicability of the gallium and Na-Ga-Pb-alloys (with different concentrations of the components) as a coolant of the LMFR are researched by the base of analysis of the physical and chemical properties, problem of compatibility with construction materials, inherent safety.

### УДК 539.1.01.07: 621.039.516

*Simulation of Spent Fuel Burnup Determination System \ S.G. Oleynik, V.A. Boltenkov; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 14 pages, 2 tables, 7 illustrations. – References, 8 titles.*

A structural chart of the system for spent fuel burnup control in real time is proposed. The formation of intensity field of gamma-radiation from monitored fuel assembly in an optional point of