

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА СПЛАВА Na-K-Cs ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

В.С. Окунев

Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет), г. Москва



Сплав Na-K-Cs может рассматриваться в качестве потенциального теплоносителя реакторов на быстрых нейтронах. В статье обсуждается выбор оптимального состава такого сплава. Этот состав может быть получен на основе решения многокритериальной оптимизационной задачи.

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшими возможностями регулирования свойств теплоносителя реактора на быстрых нейтронах (БР) обладают многокомпонентные сплавы жидких металлов. Если задача оптимизации соотношения концентраций компонентов бинарного сплава с точки зрения того или иного критерия качества достаточно тривиальна, то при переходе к теплоносителям на основе трехкомпонентных систем решение такой задачи трудоемко и может быть связано с серьезными проблемами. Сложность решения подобных задач многократно возрастает, если отдельные компоненты сплава способны образовывать эвтектику и если при определенных соотношениях концентраций составляющих элементов возможно качественное изменение химических свойств сплава. В первую очередь эти замечания относятся к трехкомпонентным сплавам щелочных металлов на основе натрия, калия и цезия, которые, как и отдельные составляющие, в том числе образующие бинарные эвтектические сплавы, могут рассматриваться в качестве потенциальных теплоносителей БР.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ГНЦ РФ-ФЗИ

Авторами [1] рассматривалась возможность применения сплава Na-K-Cs в качестве теплоносителя РУ. Показано, что в интервале температур 300...1000 К при определенных соотношениях концентрации компонентов такой сплав окисляется на воздухе «без интенсивного выделения аэрозолей и заметного повышения температуры». Область невоспламеняемости описывается неравенством

$$(6 C_{Na} - 1)^2 - 8 C_K C_{Cs} + 1 \leq 0, \quad (1)$$

где C_{Na} , C_K , C_{Cs} - атомные доли натрия, калия и цезия соответственно [1].

АНАЛИЗ ВНУТРЕННЕЙ САМОЗАЩИЩЕННОСТИ

В работе [2] представлены результаты расчетно-оптимизационного анализа внутренней самозащищенности БР, охлаждаемого эвтектикой Na-K-Cs. Показано, что безопасность реактора при использовании такого сплава в качестве теплоносителя может быть обеспечена за счет внутренне присущих свойств и пассивных систем при снижении энергонапряженности активной зоны по сравнению с традиционными БР с натриевым охлаждением. Так для РУ типа «Суперфеникс» половинной мощности (иначе говоря, РУ мощностью БН-600 с размерами активной зоны, соответствующими «Суперфениксу»), заполненной теплоносителем Na-K-Cs, в принципе достижима внутренняя самозащищенность от аварий LOFWs (нарушение принудительной циркуляции теплоносителя первого контура, сопровождающееся отказом аварийной защиты), LOHS WS (нарушение теплоотвода от первого контура с отказом аварийной защиты), TOP WS (ввод положительной реактивности с отказом аварийной защиты) и OVC WS (переохлаждение теплоносителя первого контура с отказом аварийной защиты). Таким образом, сплав Na-K-Cs может быть использован в качестве теплоносителя БР.

ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА СПЛАВА

Процесс оптимизации соотношения концентраций компонентов, иначе говоря, состава сплава Na-K-Cs с точки зрения минимизации стоимости теплоносителя, повышения внутренней самозащищенности от аварий с нарушением теплоотвода, захлаживанием и потерей теплоносителя, носит конфликтный характер. Использованию цезия (увеличению концентрации цезия в сплаве) препятствуют его высокая активизируемость в активной зоне реактора и малое производство (высокая стоимость). Повышение концентрации цезия в сплаве Na-K-Cs приводит к уменьшению пустотного эффекта реактивности (ПЭР), с одной стороны, и ухудшению самозащищенности от аварий с нарушением теплоотвода - с другой. Первый эффект объясняется меньшей замедляющей способностью более тяжелых элементов (калия и цезия по сравнению с натрием) и, следовательно, меньшим влиянием потери теплоносителя БР на спектр нейтронов; второй обусловлен снижением температуры кипения сплава по сравнению с чистыми натрием и калием. В то же время температура замерзания эвтектики Na-K-Cs настолько низка (175 K), что этим преимуществом трудно воспользоваться на практике (достаточно обеспечить незамерзаемость теплоносителя при нормальных условиях - давлении 1 атм, минимальной температуре теплоносителя 293 K). Незначительное изменение концентрации цезия в сплаве Na-K-Cs приведет к незначительному, с точки зрения обеспечения самозащищенности от аварий с захлаживанием теплоносителя, увеличению температуры замерзания сплава (по сравнению с эвтектикой).

Таким образом, имеет смысл решения задачи минимизации концентрации цезия в сплаве Na-K-Cs при условии сохранения основных преимуществ использования такого теплоносителя - невоспламеняемости и детерминистического исключения замерзания в реакторе. Первое условие определяется выражением (1), второе - незамерзанием сплава при нормальных условиях. Условие невоспламеняемости доминирует при выборе теплоносителя РУ нового поколения. Оно выполнимо для достаточно широкого диапазона концентрации цезия в сплаве: в соответствии с условием (1) от 19 до 69% атомов или от 46,6 до 89,2 % по массе (эвтектика соответствует массовому содержанию цезия 73,8%). Незамерзаемость сплава обеспечивается в точке эвтектики и вблизи нее, т.е. при незначительном отклонении концентрации цезия в сплаве от 73,8%, а также при малом (в идеале, нулевом) содержании цезия в сплаве Na-K-Cs. В отсутствие цезия натрий и калий

могут образовывать эвтектические сплавы при массовом содержании натрия 22 и 56%, температура замерзания которых 262 и 292 К соответственно.

ЗАДАЧА ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Вообще говоря, проблема выбора наилучшего соотношения концентраций компонентов сплава Na-K-Cs - задача непрерывной многокритериальной (или векторной) оптимизации. В общем виде она может быть сформулирована как задача поиска вектора управления \mathbf{u} с компонентами $\{u_k\}$, $k=1,2,\dots,K$, из области определения $u_k^{\min} \leq u_k \leq u_k^{\max}$, при которых функционалы $F_i(\mathbf{u})$, $i=1,2,\dots,J$ принимают оптимальное (минимальное или максимальное) значение и выполняются ограничения для функционалов $F_i(\mathbf{u}) \leq F_i^{\text{доп}}$, $i=J+1, J+2, \dots, I$. Функционалы $F_i(\mathbf{u})$ также зависят от переменных состояния, определенных на решениях известных уравнений. Предполагается, что значения u_k^{\min} , u_k^{\max} и $F_i^{\text{доп}}$ известны. В данном случае в качестве компонентов вектора управления выбираются концентрации натрия, калия и цезия в сплаве, а также параметры компоновки, решетки твэлов, расход теплоносителя при работе реактора на номинальной мощности, обогащение топлива и др., а в качестве функционалов $F_i(\mathbf{u})$, $i=1, 2, \dots, I$ - стоимость теплоносителя, критерии надежности, ПЭР, параметры, характеризующие наиболее опасные аварийные ситуации из числа ATWS (режимы, сопровождающиеся отказом аварийной защиты): экстремальные температуры компонентов реактора, мощность, давление в газовой полости твэлов, прочностные и прочие характеристики в аварийных режимах работы РУ, т.е. функционалы безопасности.

Решение такой задачи не является строго математической проблемой и представляет собой совокупность неформальных процедур [3]. Общая постановка задачи, связанная с формированием системы критериев качества, и выбор наиболее предпочтительного варианта решения, как правило, не формализованы и носят субъективный характер. Решение задачи облегчается благодаря статистической взаимосвязи некоторых критериев, определяемой коэффициентом λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) множественной корреляции [3]. Например, для таких критериев как стоимость теплоносителя и ПЭР $\lambda=0$; стоимость теплоносителя и внутренняя самозащищенность от аварий с нарушением теплоотвода (LOF WS, LOHS WS) $\lambda=1$, хотя последнее условие может присутствовать в оптимизационной задаче в виде ограничений для соответствующих функционалов безопасности, что более предпочтительно.

МНОЖЕСТВО ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ

Учитывая факторы субъективного характера, отдавая предпочтение тем или иным критериям качества, вообще говоря, можно получить различные оптимальные решения, т.е. оптимальное содержание цезия в сплаве Na-K-Cs может быть различным. И тем не менее, отдавая предпочтение определенным вариантам решения многокритериальной задачи, можно выделить, по крайней мере, девять оптимумов, или девять решений V_1, V_2, \dots, V_9 , каждое из которых получено при условии предпочтительности того или иного критерия качества:

1) V_1 , если в качестве наиболее предпочтительного критерия выбрана стоимость теплоносителя: $V_1 = \{0\% \text{Cs}, 0\% \text{K}, 100\% \text{Na}\}$ (здесь и далее в процентах указано массовое содержание);

2) V_2 - стоимость теплоносителя и внутренняя самозащищенность от аварий с захолаживанием - $0\% \text{Cs}-22\% \text{Na}-78\% \text{K}$ (т.е. эвтектика Na-K);

3) V_3 - ПЭР - $100\% \text{Cs}$;

4) V_4 - внутренняя самозащищенность от аварий с нарушением теплоотвода - $100\% \text{Na}$;

5) V_5 - обеспечение невоспламеняемости теплоносителя - множество оптимальных концентраций, удовлетворяющих условию (1) т.е. область оптимальности с центром в точке 3,5%Na-21,9%K-74,6%Cs [1];

6) V_6 - внутренняя самозащищенность от аварий с захолаживанием - 4,2%Na-22,0%K-73,8%Cs (эвтектика);

7) V_7 - внутренняя самозащищенность от аварий с захолаживанием и невоспламеняемость - эвтектика Na-K-Cs;

8) V_8 - ПЭР и невоспламеняемость теплоносителя - определяется условием (1) при максимальном содержании цезия - 89,2% Cs;

9) V_9 - стоимость теплоносителя, невоспламеняемость, внутренняя самозащищенность от аварий с нарушением теплоотвода - определяется условием (1) при минимальном содержании цезия - 7,1%Na-46,3%K -46,6%Cs.

ПОИСК НАИБОЛЕЕ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Оптимум, соответствующий низкой стоимости теплоносителя, отрицательному ПЭР, наилучшей самозащищенности от аварий с захолаживанием теплоносителя и нарушением теплоотвода, потерей теплоносителя в результате его сгорания и минимальной стоимости теплоносителя, может быть определен однозначно только при учете весовых коэффициентов, отражающих значимость всех перечисленных критериев. Иначе говоря, определение оптимального управления требует проведения предварительного ранжирования вышеперечисленных факторов (критериев) и аварийных ситуаций по степени значимости и опасности. Очевидно, что этот optimum принадлежит интервалу концентрации цезия, при которой сплав Na-K-Cs не воспламеняется, т.е. 46,6...89,2%Cs. Учитывая, что внутренняя самозащищенность от аварий типа ATWS и отрицательный ПЭР могут быть достигнуты оптимальным выбором параметров компоновки, решетки твэлов и другими техническими решениями конструкции реактора, именно критерию невоспламеняемости при прочих приблизительно равных условиях и следует отдавать предпочтение при выборе теплоносителя РУ нового поколения.

Ранжирование вариантов по степени значимости и выбор наиболее предпочтительного решения могут основываться на идеях и методах решения дискретных многокритериальных задач. В рассматриваемом случае множество анализируемых объектов (V_1, V_2, \dots, V_9) конечно. Из этих девяти объектов задачи дискретной оптимизации можно выделить множество наиболее предпочтительных решений (объектов). К такому множеству следует отнести варианты V_5, V_6, V_7, V_8, V_9 .

При проектировании энергетических реакторов для широкомасштабной ядерной энергетики будущего предпочтительность отдается таким критериям как экономическая эффективность (в рассматриваемой задаче — стоимость теплоносителя) и безопасность.

При использовании теплоносителя на основе сплава Na-K-Cs в единичных блоках РУ специального назначения (например, БР, предназначенных для трансмутации младших актинидов) улучшение экономических показателей реактора менее актуально. Отдавая предпочтение трем критериям задачи (невоспламеняемость, наименьший ПЭР и наилучшая самозащищенность от аварий с нарушением теплоотвода), можно выделить эффективные объекты. К ним относятся варианты V_5, V_6, V_7, V_8, V_9 . Эти объекты являются доминирующими и более предпочтительны, чем V_1, V_2, V_3, V_4 . Таким образом, в задаче поиска наиболее предпочтительного объекта варианты V_1, V_2, V_3, V_4 можно не рассматривать.

Суть дальнейшего анализа проиллюстрирована с помощью рисунка. Здесь F_1, F_2 и F_3 - критерии оптимальности (целевые функционалы), определяющие невоспла-

меняемость, наименьший ПЭР и наилучшую самозащищенность от аварий с нарушением теплоотвода соответственно. Определим их. Пусть R - расстояние от центра эллипса (1) до точки, соответствующей решению V_5, V_6, V_7, V_8 или V_9 в координатах атомных концентраций Na, K и Cs , тогда

$$\Phi_1 = -R,$$

$$\Phi_2 = -\text{ПЭР},$$

$$\Phi_3 = (T_{\text{доп}} - T_{\text{LOF}}) + (T_{\text{доп}} - T_{\text{LOHS}}) = 2T_{\text{доп}} - T_{\text{LOF}} - T_{\text{LOHS}},$$

где $T_{\text{доп}}$ - максимально допустимая температура теплоносителя (выбирается с учетом температурного запаса до кипения); $T_{\text{LOF}}, T_{\text{LOHS}}$ - максимальная температура теплоносителя в аварийных режимах LOFWS LOHS WS соответственно, причем условию самозащищенности соответствует $T_{\text{доп}} \geq T_{\text{LOF}}, T_{\text{доп}} \geq T_{\text{LOHS}}$. Переходя к относительным (безразмерным) значениям F_1, F_2, F_3 функционалов Φ_1, Φ_2, Φ_3 соответственно, определим область в координатах (F_1, F_2, F_3) , в которой находятся доминирующие объекты. Эта область эффективных объектов ограничена тремя плоскостями А, Б и В (см. рис. 1), соответствующими $F_i \geq F_i^{\min}$ (где $i=1, 2, 3$); F_i^{\min} - минимально допустимое значение соответствующего функционала. Линии пересечения плоскостей А и Б, Б и В, А и В параллельны осям $[OF_1], [OF_3]$ и $[OF_2]$ соответственно. Точка O_2 соответствует условиям $F_1 = F_1^{\min}, F_2 = F_2^{\min}$ и $F_3 = F_3^{\min}$. Цель задачи - максимизация F_i при условии $F_i \geq F_i^{\min}$ (в рассматриваемом случае $i=1, 2, 3$).

Упорядочим варианты V_5, V_6, V_7, V_8, V_9 по предпочтению. Отметим, что решения V_6 и V_7 совпадают (соответствуют концентрациям эвтектики), поэтому одно из них, например, V_6 , можно исключить из рассмотрения. Запишем оставшиеся объекты в порядке предпочтения - с точки зрения максимизации функционала F_1 : V_5, V_7, V_8, V_9 ; максимизации F_2 : V_8, V_5, V_7, V_9 ; максимизации F_3 : V_9, V_7, V_5, V_8 . Из рисунка видно, что объект V_8 принадлежит плоскости А, т.е. для него $F_3 = F_3^{\min}$. Объект V_9 принадлежит оси F_3 , иначе говоря, плоскостям Б и В, т.е. для него $F_1 = F_1^{\min}$ и $F_2 = F_2^{\min}$. Таким образом, объект V_8 можно считать более предпочтительным, чем V_9 . Варианты V_5, V_7 лежат внутри области доминирующих объектов на некотором удале-

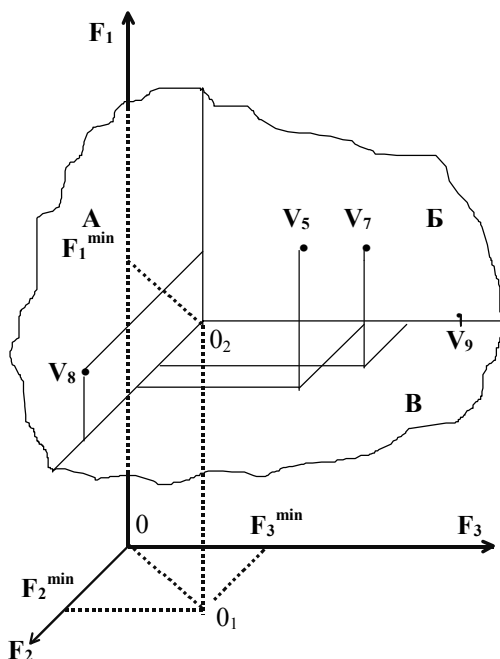


Рис. 1. Общий вид области эффективных объектов

нии от границы этой области, т.е. для них выполняются строгие неравенства $F_i > F_i^{\min}$ ($i = 1, 2, 3$), причем V_5 доминирует дважды, т.е. по двум критериям: и при максимизации F_1 , и при максимизации F_2 , а вариант V_7 – один раз (при максимизации функционала F_3). Таким образом, наиболее предпочтительным объектом можно считать вариант V_5 . Если считать все сплавы на основе натрия, калия и цезия с комбинациями концентраций компонентов из области (1) «равновоспламеняющимися», то приближение к центру области невоспламеняемости внутри (1) теряет смысл, иначе говоря, не имеет смысла максимизация функционала F_1 внутри области (1). В этом случае достаточно выполнить условие $F_i \geq F_i^{\min}$ и наиболее предпочтительным решением следует считать V_7 ($V_7 \ll V_6$), соответствующее эвтектике. Строго говоря, выбор наилучшего решения из V_5 и V_7 должен проводиться с учетом коэффициентов значимости критериев F_1 , F_2 и F_3 . Ранжирование аварийных событий по степени значимости (опасности, важности) может быть проведено, например, по методике, предложенной в работе [4].

Выбор наиболее предпочтительного решения при проектировании энергетических РУ требует использования дополнительных целевых функционалов, учитывающих экономические характеристики, и минимизацию одного или нескольких из них. В этом случае оптимизация состава сплава Na-K-Cs в первом приближении должна проводиться при условиях его минимальной стоимости и максимизации безопасности реактора, охлаждаемого таким теплоносителем. Наиболее предпочтительным решением такой задачи является вариант V_9 , позволяющий обеспечить внутреннюю самозащищенность от основных типов аварий, наиболее опасных для БР с жидкометаллическим охлаждением активной зоны, и снизить стоимость теплоносителя благодаря уменьшению массового содержания цезия (в 1,58 раза по сравнению с эвтектикой) в сплаве, т.е. оптимум принадлежит границе области изменения концентраций, определяемой условием (1).

Решение V_9 принадлежит линии пересечения плоскостей Б и В, т.е. условию $F_3 = F_3^{\min}$. Дальнейшее повышение экономической эффективности реактора возможно при комплексной оптимизации его параметров, предполагающей поиск оптимального управления u , в качестве компонентов которого выбираются не только концентрации натрия, калия и цезия в сплаве, но и параметры компоновки, решетки твэлов, расход теплоносителя, обогащение топлива и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что оптимальный состав сплава Na-K-Cs для применения в качестве теплоносителя БР может быть получен в результате решения задачи многокритериальной оптимизации. Причем, для РУ различного целевого назначения оптимальные (наиболее предпочтительные) решения могут быть различны, и для сплавов, образующих эвтектику, оптимум не всегда совпадает с точкой эвтектики.

Расчеты проведены с помощью программ DRACON-M и FRISS-2D [5] для традиционной компоновки БР с нитридным топливом.

Литература

1. Казачковский О.Д., Старков А.В., Кочеткова Е.А. и др. Некоторые особенности сплавов системы натрий-калий-цезий // Атомная энергия. - 1992. - Т.73. - Вып.6. - С. 500-502.
2. Окунев В.С. Основы возможной концепции и оптимизация характеристик естественной безопасности реакторов на быстрых нейтронах с различными видами топлива, охлаждаемых сплавом Na-K-Cs // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2000. - №2. - С. 111-120.
3. Елтаренко Е.А. Оценка и выбор решений по многим критериям: Учеб. пособие. М.: МИФИ, 1995.
4. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Возможность сокращения размерности задачи оптимального проектирования самозащищенных реакторов // Атомная энергия. - 1997. - Т.82. - Вып.3. - С. 178-184.
5. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Программно-методическое обеспечение для решения задач оптимизации компоновок ядерных реакторов нового поколения // Известия РАН. Энергетика. - 1996. - №5. - С. 66-74.

Поступила в редакцию 9.11.2000

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.564:53.082.4

Automatic Control System of Stressed State of a Metal for Technological Channels at Steel-zirconium Adapter of RBMK-type Nuclear Reactors \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, A.A. Zilper; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 7 illustrations, 9 tables.-References, 9 titles.

The results of development system for measuring of changes of stressed metal construction states have been shown in this article. The system can be used for control of the stressed state of adapters of RBMK-type reactor fuel channels. The changes of stressed state are determined by means of ultrasonic wave velocity changes which are generated in the suffered materials.

УДК 51-72:531.15

Analysis of a Rotor Working Equations with Electromagnetic Bearings \E.V. Gaivoronskaya, S.V. Lebedeva; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 5 pages, 2 illustrations.-References, 3 titles.

The problem of the creation of vertical turbine machine with electromagnetic bearings is considered with reference to high-temperature gas reactor. Simple formulas of the precession frequency and nutation frequency of the shaft are derived on the basis of solutions of the shaft working equations for the special cases depending on a sistem parameters.

УДК 621.039.584

The Calculational Study of the Possibility of Corium Confinement in the Catcher with the Walls Cooled by Impinging Jets \M.V. Kachtcheev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 4 illustrations.-References, 5 titles.

A catcher with the walls cooled by impinging jets has been considered as a device for corium cooling and confinement outside the reactor vessel. The proposed catcher design enables the basic problems of corium confinement and cooling after its release from the reactor vessel to be solved. The calculational study for corium-to-catcher shell interaction using the PPRKRS code has been performed. It can be applied for the analysis of the possibility of corium confinement in the catcher of any design.

УДК 621.039.526

On Selection of Optimal Composition of the Na-K-Cs-alloy for LMFR Core Cooling \V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 7 pages, 1 illustration.-References, 5 titles.

The Na-K-Cs-alloy may be considered as a potential coolant for the LMFR. In this paper are discussed the selection of the optimal composition of this alloy. This composition may be obtained as the solution of multicriteria optimization problem.

УДК 681.3:621.039.548

The Calculation Analysis of Experiments on Destruction of Electroheated Fuel Element Simulators \G.N. Vlasichev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 10 pages, 6 illustrations.-References, 18 titles.

The technique and computer program for account of emergency process of cylindrical fuel elements heating and melting are developed. Calculating analysis of experiments on electrical