

УДК 541.13+11

prytkov.l.n@mail.ru

**ПОВЕДЕНИЕ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПРИ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ РЕАКТОРА  
НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ****BEHAVIOR OF THE GAS PHASE IN A DESIGN ACCIDENT  
OF A FAST NEUTRON REACTOR**

*Прытков Л. Н.,  
Терентьев Д. И., кандидат химических наук, доцент  
Барбин Н. М., доктор технических наук, доцент  
Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург*

*Prytkov L., Terent'ev D., Barbin N.,  
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia,  
Yekaterinburg*

Представлены и обсуждаются результаты термодинамического моделирования при разгерметизации трубопровода 1 контура с натриевым теплоносителем в активной зоне реактора на быстрых нейтронах, полученные авторами в программе TERRA. Моделирование проводилось в диапазоне температур от 473 до 3273 К для определения вероятного состава газовой фазы, образовавшейся в результате запроектной аварии в атмосфере аргона. В статье представлены компоненты газовой фазы, содержание которых не превышает  $1 \cdot 10^{-6}$  мольной доли, другие соединения с меньшей концентрацией в данной работе не рассматриваются. Установлено, что до 873 К мольная доля аргона Ar не изменяется и составляет порядка 99 %, при этом происходит увеличение концентраций молекулярного водорода H<sub>2</sub>, паров натрия Na, кластеров натрия Na<sub>2</sub>, Na<sub>3</sub> по причине плавления и испарения металлического натрия. Резкое снижение содержания молекулярного азота наблюдается с 1073 К до 1173 К, после чего практически не изменяется. При температуре от 1173 К и выше происходит термическая деструкция кластеров натрия Na<sub>2</sub>, Na<sub>3</sub> и основным компонентом газовой фазы становятся пары натрия Na. При температуре 1873 К происходит повышение содержания ионизированного пара натрия Na<sup>+</sup> и уменьшение концентрации гидрида натрия.

*Ключевые слова:* запроектная авария, жидкометаллический натрий, атомная электростанция, термодинамическое моделирование, газовая фаза, атмосфера аргона.

The results of thermodynamic modeling in case of depressurization of the pipeline of the 1st loop with sodium coolant in the active zone of a fast neutron reactor obtained by the authors using the TERRA program are presented and discussed. Modeling was carried out in the temperature range from 473 to 3273 K to determine the probable composition of the gas phase formed as a result of a beyond design basis accident in an argon atmosphere. The article presents the components of the gas phase, the content of which does not exceed  $1 \cdot 10^{-6}$  mole fraction, other compounds with a lower concentration are not considered in this work. It has been established that up to 873 K the mole fraction of argon Ar does not practically change and is about 99 %, while the concentrations of molecular hydrogen H<sub>2</sub>, sodium vapor Na, sodium clusters Na<sub>2</sub>, Na<sub>3</sub> increase due to melting and evaporation of metallic sodium. A sharp decrease in the content of molecular nitrogen is observed from 1073 K to 1173 K, after which it practically does not change. At a temperature of 1173 K and above, thermal destruction of sodium Na<sub>2</sub> and Na<sub>3</sub> clusters occurs,

and sodium Na vapor becomes the main component of the gas phase. At a temperature of 1873 K, there is an increase in the content of ionized sodium vapor  $\text{Na}^+$  and a decrease in the concentration of sodium hydride.

*Keywords:* beyond design basis accident, liquid metal sodium, nuclear power plant, thermodynamic modeling, gas phase, argon atmosphere.

Вопросы повышения энергоэффективности страны за счет модернизации АЭС являются крайне актуальными и рассматривались во многих исследованиях [1–3].

Технологический цикл тепловых АЭС, теплоносителем которых является вода, характеризуется температурой на выходе из реактора порядка 320 °С, давление пара во 2 контуре составляет 6,3–7,2 МПа, а температура – в диапазоне 279–285 °С. Мощность турбоустановки достигается за счет повышения давления пара, что способствует увеличению потерь тепловой энергии в конденсаторе турбины [1].

В реакторах на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800 в качестве теплоносителя применяется натрий – это жидкий металл, способный отводить удельные тепловыделения. Температура натриевого теплоносителя в 1 контуре, на выходе из зоны реактора, составляет примерно 550 °С, что способствует выработке перегретого пара в парогенераторах под давлением 13 МПа при температуре 505 °С. Данные параметры позволяют повысить эффективность АЭС [4]. Реакторы с натриевым теплоносителем и замкнутым ядерным топливным циклом позволяют существенно увеличить эффективность применения природного урана и помогут в решении проблемы с накопленными ядерными отходами [5]. Вопросы обеспечения безопасности как АЭС в целом, так и данных типов реакторов являются актуальными и рассматривались во многих работах [6–8].

Ключевой особенностью быстрых реакторов является применение в качестве теплоносителя в 1 и 2 контуре металлического натрия. По причине большой химической активности при взаимодействии

натрия с кислородом воздуха, паром и водой, контуры, заполненные натрием, оборудованы герметичными страховочными кожухами, которые заполнены очищенным от кислорода аргоном. Данное решение позволяет избежать взаимодействия жидкометаллического натрия с воздухом в случае разгерметизации и протечки теплоносителя. Ключевой особенностью натриевого теплоносителя, применяемого в 1 контуре, является воздействие на него нейтронного излучения [9]. Радиоактивный натрий представляет серьезную угрозу для персонала АЭС, пожарная опасность и перспективность применения натрия в качестве теплоносителя рассмотрена в работе [10].

При запроектной аварии возможно попадание расплавленного натрия в защитный кожух, заполненный аргоном. Для изучения состава и поведения газов и паров при нагревании натриевого теплоносителя в атмосфере аргона применялся метод термодинамического моделирования в программе TERRA [11–13]. Исходная система при давлении 0,1 МПа состоит из:

- 1) натрия (Na) – 990 г;
- 2) цезия (Cs) – 0,00007 г;
- 3) кадмия (Cd) – 0,00001 г;
- 4) аргона (Ar) – 9,9999 г;
- 5) плутония (Pu) – 0,00001 г;
- 6) серебра (Ag) – 0,00001 г;
- 7) сурьмы (Sb) – 0,00001 г;
- 8) олова (Sn) – 0,00001 г;
- 9) марганца (Mn) – 0,00001 г;
- 10) азота ( $\text{N}_2$ ) – 0,03 г;
- 11) водорода ( $\text{H}_2$ ) – 0,002 г;
- 12) метана ( $\text{CH}_4$ ) – 0,0001 г.

На рис. приведена температурная зависимость состава газовой фазы в системе при давлении 0,1 МПа.

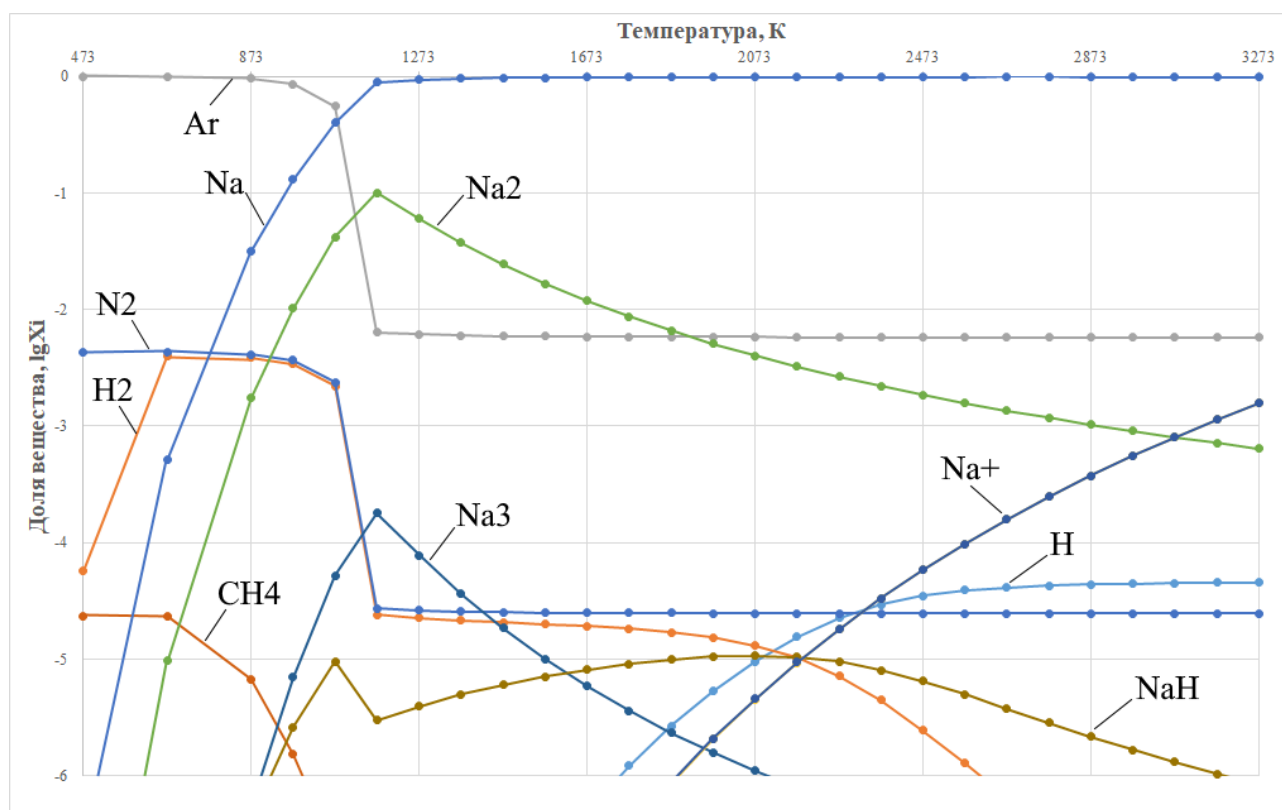


Рисунок. График изменения состава газовой фазы

Из данных рисунка видно, что в температурном интервале от 473 К до 873 К газовая фаза состоит в основном из аргона, также присутствуют пары натрия, молекулярного азота, молекулярного водорода и метана. В данном интервале температур значительного изменения концентрации Ar не наблюдается. Следует отметить резкое повышение содержания паров Na и Na<sub>2</sub>, повышение содержания H<sub>2</sub> наблюдается до 673 К, после чего происходит незначительное снижение. Содержание CH<sub>4</sub> сохраняется до 673 К, после чего при температуре 973 К происходит уменьшение концентрации в системе ниже  $1 \cdot 10^{-6}$ .

Температурный диапазон от 873 К до 1173 К характеризуется значительными изменениями состава газовой фазы. Концентрация Ar начинает снижаться от 873 К до 1173 К, после чего остается неизменной. В рассматриваемом температурном интервале основным компонентом газовой фазы являются пары Na и при температуре 1173 К составляют более 99 % от общей

доли объема всех газовых компонентов системы. Концентрация Na<sub>2</sub> продолжает повышаться до 1173 К, после чего происходит его разложение. Содержание в системе N<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> резко снижается до 1173 К, при дальнейшем повышении температуры наблюдается постепенное снижение концентрации H<sub>2</sub> и неизменное содержание N<sub>2</sub> менее  $1 \cdot 10^{-4}$ . Пары Na<sub>3</sub> начинают увеличиваться с 873 К до 1173 К, после чего происходит снижение их содержания. Количество паров гидрида натрия NaH в рассматриваемой системе начинает увеличиваться от 873 К до 1073 К, в температурном интервале от 1073 К до 1173 К наблюдается незначительное снижение количества рассматриваемого вещества, при достижении в системе 1173 К наблюдается постепенное повышение содержания паров гидрида натрия NaH.

В температурном интервале от 1173 К до 2073 К наблюдается уменьшение содержания Na<sub>2</sub>. Количество паров Na<sub>3</sub> резко уменьшается и при температуре

2073 К составляет порядка  $1 \cdot 10^{-6}$ , что вероятнее всего связано с термической диссоциацией кластера. Концентрация молекулярного водорода  $H_2$  в данном температурном диапазоне постепенно уменьшается. Пары гидрида натрия  $NaH$  увеличиваются и при температуре 2073 К составляют  $1 \cdot 10^{-5}$ .

В диапазоне температур от 2073 К до 3273 К концентрации натрия  $Na$ ,  $Ag$ , молекулярного азота  $N_2$  не подвержены существенным изменениям. Снижение количества  $Na_2$  происходит на всем температурном интервале. Концентрация  $H_2$  при температуре 2673 К составляет менее  $1 \cdot 10^{-6}$ . Содержание  $NaH$  в составе газовой фазы

системы при температуре 3173 К составляет  $1 \cdot 10^{-6}$ . При рассматриваемой температуре концентрация ионизированного натрия  $Na^+$  продолжает увеличиваться и при 3273 К достигает  $1 \cdot 10^{-2.8}$ .

В работе проведено моделирование термических процессов, проходящих в системе с натриевым теплоносителем в атмосфере аргона. По полученным результатам построены графические зависимости изменения мольной доли веществ в газовой фазе в зависимости от температуры. Результаты компьютерного моделирования позволили обнаружить интервалы температур, при которых происходят процессы термической деструкции различных веществ.

#### Литература

1. Щепетина Т. Д. О повышении КПД энергоблоков с водо-водяными реакторами (ВВР) // Энергия: экономика, техника, экология. 2010. № 12. С. 21–29.
2. Хоменок Л. А., Кругликов П. А., Смолкин Ю. В., Соколов К. В. Определение энергетического эффекта модернизации энергооборудования и технологических систем АЭС // Теплоэнергетика. 2012. № 5. С. 10.
3. Асмолов В. Г., Семченков Ю. М., Сидоренко В. А. Облик АЭС с легководными энергетическими реакторами следующего поколения // VII Междунар. науч.-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». М., 2010, С. 3–14.
4. Щеклеин С. Е., Ташлыков О. Л., Дубинин А. М. Повышение энергоэффективности АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2015. № 4. С. 15–25.
5. Адамов Е. О., Алексахин Р. М., Большов Л. А. и др. Проект «ПРОРЫВ» – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2015. № 1. С. 5–13.
6. Прытков Л. Н., Барбин Н. М., Кобелев А. М. и др. Моделирование пожара в типовом машинном зале атомной электростанции для оценки эффективности внедрения роботизированных установок пожаротушения // Техносферная безопасность. 2021. № 4 (33). С. 78–88.
7. Горбань Ю. И. Пожарные роботы в современных технологиях автоматического пожаротушения // Алгоритм безопасности. 2010. № 3. С. 66–71.
8. Кобелев А. М., Барбин Н. М., Терентьев Д. И. и др. Экологические последствия при возможной запроектной аварии на уран-графитовых реакторах // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: мат. V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Всемир. дню гражданской обороны, Москва, 1 марта 2021 г. – М., 2021. – С. 237–240.
9. Козлов Ф. А., Алексеев В. В., Загоруйко Ю. И. и др. Технология использования натрия как теплоносителя реакторов на быстрых нейтронах // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: сб. тезисов докладов VI Междунар. науч.-техн. конф. 21–23 мая 2008 г. – М., 2008. – С. 270–276.
10. Прытков Л. Н., Барбин Н. М., Кобелев А. М., Титов С. А. Анализ пожарной опасности натриевого теплоносителя // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: мат. Всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 26 апреля 2022 г. – СПб., 2022. – С. 22–24.
11. Ватолин Н. А., Моисеев Г. К., Трусов Б. Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных системах. М., 1994.
12. Моисеев Г. К., Вяткин Г. П., Барбин Н. М. Применение термодинамического моделирования для изучения взаимодействия с участием ионных расплавов. Челябинск, 2002. 166 с.
13. Барбин Н. М., Терентьев Д. И., Алексеев С. Г., Борисенко А. В. Термодинамическое моделирование испарения расплавов  $Pb+Bi$  при низких давлениях // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. тр., Томск, 4–6 октября 2012 г. – Томск, 2012. – С. 60–63.

## References

1. SHCHepetina T. D. O povyshenii KPD energoblokov s vodo-vodyanymi reaktorami (VVR) // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2010. № 12. S. 21–29
2. Homenok L. A., Kruglikov P. A., Smolkin Yu. V., Sokolov K. V. Opredelenie energeticheskogo effekta modernizacii energooborudovaniya i tekhnologicheskikh sistem AES // Teploenergetika. 2012. № 5. S. 10.
3. Asmolov V. G., Semchenkov Yu. M., Sidorenko V. A. Oblik AES s legkovodnymi energeticheskimi reaktorami sleduyushchego pokoleniya // VII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoj energetiki». M., 2010. S. 3–14.
4. SHCHeklein S. E., Tashlykov O. L., Dubinin A. M. Povyszenie energoeffektivnosti AES // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. YAdernaya energetika. 2015. № 4. S. 15–25.
5. Adamov E. O., Aleksahin R. M., Bol'shov L. A. i dr. Proekt "PRORYV" – tekhnologicheskij fundament dlya krupnomasshtabnoj yadernoj energetiki // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika. 2015. № 1. S. 5–13.
6. Prytkov L. N., Barbin N. M., Kobelev A. M. i dr. Modelirovanie pozhara v tipovom mashinnom zale atomnoj elektrostancii dlya ocenki effektivnosti vnedreniya robotizirovannyh ustanovok pozharotusheniya // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2021. № 4 (33). S. 78–88.
7. Gorban' Yu. I. Pozharnye roboty v sovremennyh tekhnologiyah avtomaticheskogo pozharotusheniya // Algoritm bezopasnosti. 2010. № 3. S. 66–71.
8. Kobelev A. M., Barbin N. M., Terent'ev D. I. i dr. Ekologicheskie posledstviya pri vozmozhnoj zaproektnoj avarii na uran-grafitovyh reaktorah // Grazhdanskaya oborona na strazhe mira i bezopasnosti: mat. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. Vsemirnomu dnyu grazhdanskoj oborony, Moskva, 1 marta 2021 g. – M., 2021. – S. 237–240.
9. Kozlov F. A., Alekseev V. V., Zagorul'ko Yu. I. i dr. Tekhnologiya ispol'zovaniya natriya kak teplonositelya reaktorov na bystryh nejtronah // Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoj energetiki: sb. tezisov dokladov VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. 21–23 maya 2008 g. – Moskva, 2008. – S. 270–276.
10. Prytkov L. N., Barbin N. M., Kobelev A. M., Titov S. A. Analiz pozharnoj opasnosti natrievogo teplonositelya // Pozharnaya bezopasnost': sovremennye vyzovy. Problemy i puti resheniya: mat. Vseros. nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg, 26 aprelya 2022 g. – SPb., 2022. – S. 22–24.
11. Vatolin N. A., Moiseev G. K., Trusov B. G. Termodinamicheskoe modelirovanie v vysokotemperaturnyh sistemah. M., 1994.
12. Moiseev G. K., Vyatkin G. P., Barbin N. M. Primenenie termodinamicheskogo modelirovaniya dlya izucheniya vzaimodejstviya s uchastiem ionnyh rasplavov. CHelyabinsk, 2002. 166 s.
13. Barbin N. M., Alekseev S. G., Alekseev K. S. // Izv. YUzhnogo federal'nogo un-ta. Tekhn. nauki. 2013. N 8. S. 245–247.