

УДК 541.13+11

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ХЛОРА
ПРИ СЖИГАНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**
**Thermodynamic simulation of chloride behavior in combustion of radioactive graphite
in the atmosphere of air**

Човишнян О.А., курсант,

Пешков А.В., кандидат технических наук, начальник учебно-методического отдела
Уральского института ГПС МЧС России

(Екатеринбург, ул. Мира, 22)

Рецензент: Терентьев Д.И., кандидат химических наук, доцент

Аннотация

Описаны теоретические основы термодинамического моделирования.

Рассмотрены возможности программного комплекса ТЕРРА для термодинамического моделирования поведения радиоактивного графита при нагревании (горении) в атмосфере воздуха. Показано, что использование методологии термодинамического моделирования и программного комплекса ТЕРРА позволяет моделировать и прогнозировать фазовые и химические превращения при нагреве (горении). Методом термодинамического моделирования изучено поведение радиоактивного хлора при сгорании радиоактивного графита в атмосфере воздуха. Установлено, что радиоактивный хлор представляет собой конденсированный и парообразный CaCl_2 , продуктом сжигания углерода при температуре выше 900K является CO и CO_2 в отношении 1:1.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, радионуклиды, радиоактивный графит, окисление (горение).

Summary

Theoretical bases of thermodynamic modeling are described.

The possibilities of the TERRA software for thermodynamic modeling of the behavior of radioactive graphite during heating (combustion) in the air atmosphere are considered. It is shown that the use of the thermodynamic modeling methodology and the TERRA software package allows modeling and predicting phase and chemical transformations during heating (combustion). The behavior of radioactive chlorine in the combustion of radioactive graphite in an air atmosphere has been studied using thermodynamic modeling. It has been established that radioactive chlorine is a condensed and vaporous CaCl_2 , the product of burning carbon at a temperature above 900K is CO and CO_2 in a ratio of 1:1.

Keywords: thermodynamic modeling, radionuclides, radioactive graphite, oxidation (combustion).

В ядерной энергетике России имеется ряд энергоблоков с реакторами, в которых в качестве активной зоны и отражателя используется графит [1].

Реакторный графит горит гетерогенно. Повышение температуры ведет к возрастанию скорости окисления графита.

При температуре до 200-250°C в графите под воздействием проникающей радиации искажается структура кристаллической решетки и вследствие этого накапливается скрытая энергия (энергия Вигнера). Если эта энергия регулярно не рассеивается путем отжига (повышения температуры), то она может накапливаться до определенной точки и затем внезапно выделяться с резким повышением температуры, которая может привести к пожару [2].

Кроме того возможна запроектная авария типа «Чернобыльской». Авария на четвертом блоке ЧАЭС привела к полному разрушению активной зоны реактора. В результате часть графитовой кладки была выброшена, часть осталась в шахте реактора. Высокая температура, присутствие кислорода способствовали окислению графита, что привело к практически полному его выгоранию в реакторном пространстве [3].

Радиоактивный графит содержит различные радионуклиды, такие как тритий и ^{14}C , а также продукты коррозии/активации (^{57}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{22}Na и т.д.), продукты деления (^{137}Cs , ^{137}C , ^{90}Sr , ^{152}Eu , ^{144}Ce и т.д.) и небольшое количество урана и элементов превращения (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am и т.д.) [4].

Радиоактивные элементы, при горении, либо остаются с негорючей частью графита, либо испаряются в зависимости от степени их летучести. Газообразные радиоактивные элементы конденсируются на более крупные частицы в потоке газов, или собираются вокруг «зародыша» и образуют собственную субмикронную аэрозоль. Вынесенные субмикронные частицы легко вдыхаются в легкие. Они могут откладываться на поверхность водоемов и продовольственные культуры [4].

В данной работе изучалось поведение радионуклидов при нагревании (горении) радиоактивного графита в атмосфере воздуха. Поведение радиоактивных элементов не отличается от поведения их нерадиоактивных изотопов [5].

Исследования проводили методом термодинамического моделирования [6-8], которое успешно использовано для изучения неорганических веществ при высоких температурах в металлургии и материаловедении [9-11], в физике [12-15].

Термодинамическое моделирование (ТДМ) заключается в термодинамическом анализе равновесного состояния систем в целом (полный термодинамический анализ). Здесь под термодинамическими системами понимаются условно выделенные материальные области, взаимодействие которых с окружающей средой сводится к обмену теплом и работой. Равновесие систем в соответствии со вторым законом термодинамики характеризуется максимумом энтропии относительно термодинамических степеней свободы, к числу которых относятся концентрации компонентов равновесной смеси (M_q , моль/кг), температура T и давление P :

$$s = \sum_{i=1}^K \left[S_i^0(T) - R_0 \ln \frac{R_0 T}{V} M_i \right] \cdot M_i + \sum_{r=1}^R S_r^0(T) M_r + \sum_N \sum_{i=1}^{Nm} \left[S_m^0(T) - R_0 \ln \frac{M_m}{M_{Nm}} \right] \cdot M_i \Rightarrow S_{\max} \quad (1)$$

где $M_i, M_r, M_m, S_i^0, S_r^0, S_m^0$ – число молей и стандартная энтропия (при температуре T, K и давлении $0,1 \text{ МПа}$) в газовой (i), конденсированной (r) фазах и в растворе (m) соответственно, Дж/(моль·К);

k, R, N – количество газообразных, конденсированных компонентов и растворов в термодинамической системе, моль, соответственно;

M_m – количество вещества в m -м конденсированном растворе, моль;

V – объем, м^3 ;

R_0 – универсальная газовая постоянная ($R_0 = 8,3144621 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$).

Удельный объем V , как и внутренняя энергия U при этом остаются неизменными переменными, так как условия равновесия системы относительно окружающей среды могут быть выражены с помощью равенства: $dV = 0$ и $dU = 0$ или $V = const$ и $U = const$.

На область допустимых значений переменных при установлении химического и фазового равновесия путем достижения максимума энтропии накладываются следующие дополнительные ограничения.

1. Постоянство полной внутренней энергии системы при равновесии:

$$U - \sum_{i=1}^K U_i M_i - \sum_{r=1}^R U_r M_r - \sum_N \sum_{m=1}^{N_m} U_{N_m} M_{N_m} = 0 \quad (2)$$

где U_i, U_r, U_{N_m} - полная внутренняя энергия конденсированных веществ, отнесенная к одному молю (Дж/моль) и включающая в себя энтальпию образования:

$$U = \int_{T_0}^T C_{V\varepsilon} dT + \Delta H_f^0(T_0) \quad (3)$$

где $\varepsilon = i, r, m$.

2. Сохранение массы всех химических элементов:

$$-b_j + \sum_{i=1}^K v_{ji} M_i + \sum_{r=1}^R v_{jr} M_r + \sum_N \sum_{m=1}^{N_m} v_{jN_m} M_{N_m} = 0 \quad (4)$$

где b_j - мольное содержание j -го химического элемента в системе, моль;

v_{ji}, v_{jr}, v_{jN_m} - числа атомов j -го элемента в газообразных, конденсированных компонентах системы и растворе, соответственно.

3. Закон сохранения заряда:

$$\sum_{i=1}^K q_{ei} M_i = 0 \quad (5)$$

где q_{ei} - кратность ионизации i -го компонента (для электронного газа $q_{ei} = -1$).

4. Уравнение состояния смеси идеальных газов:

$$pV - R_0 T \sum_{i=1}^K M_i = 0 \quad (6)$$

где p - давление, Па.

Параметры равновесия термодинамической системы определяются решением математической задачи о нахождении экстремума с учетом всех ограничений с использованием функции Лагранжа. Для вычислений использован метод последовательных приближений Ньютона, который обеспечивает высокую скорость сходимости результатов на конечных стадиях итерационного процесса. Программный комплекс ТЕРРА предусматривает задание условий равновесия термодинамической системы с окружающей средой любой парой значений термодинамических параметров из числа следующих шести величин: P (давление), V (удельный объем), T (температура), S (энтропия), H (энтальпия), U (внутренняя энергия), проведение равновесного расчета термодинамической системы произвольного элементного состава, включение в число ожидаемых компонентов равновесного состава любых индивидуальных веществ за счет изменения только исходных данных, определение равновесного фазового состава системы без предварительного указания термодинамически допустимых состояний. Таким образом, для определения конкретных параметров состояния системы необходимо задать две ее характеристики (например: P и T , V и T , H и P и т.д.), массовые содержания химических элементов в рабочем теле, список потенциально возможных и в равновесии индивидуальных веществ с их термодинамическими функциями – энтропией и энтальпией. В программном комплексе ТЕРРА предусмотрена также возможность учета некоторых неидеальностей: исключения из числа компонентов равновесия любых индивидуальных веществ; возможность назначать (фиксировать) концентрации одного или нескольких веществ с последующим расчетом равновесия по оставшейся части системы; рассмотрение неидеальных

конденсированных растворов путем задания избыточной энергии Гиббса; учет собственного объема, занимаемого конденсированными веществами.

Нагревание (горение) радиоактивного графита в атмосфере воздуха

Состав конденсированной фазы представлен на рис. 1.

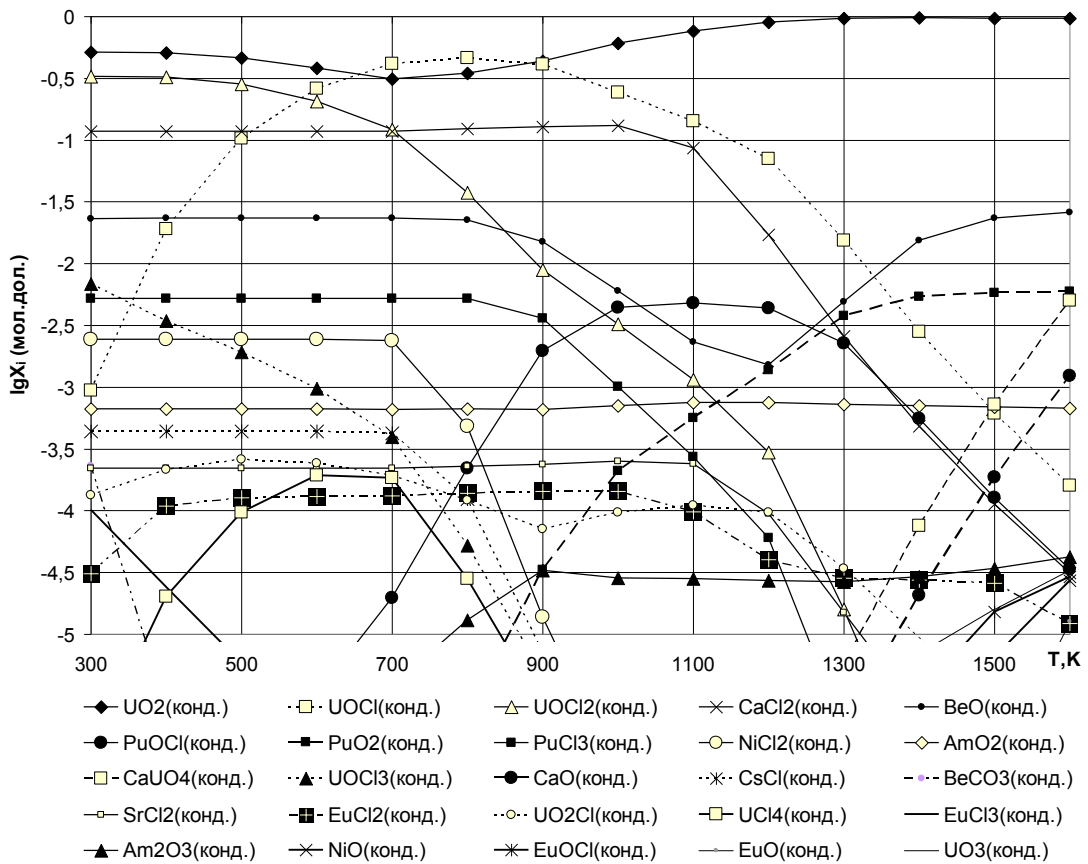


Рис. 1 Состав конденсированной фазы при сжигании радиоактивного графита в атмосфере воздуха

Видно, что наиболее значимыми компонентами являются UO_2 , $UOCl$, $UOCl_2$, $CaCl_2$, BeO . Их концентрация превышает 10^{-2} мол. дол. В интервале температур 1300 – 1500 К UO_2 становится преобладающим компонентом с концентрацией 0,98 мол. дол.

Состав газовой фазы приведен на рис. 2.

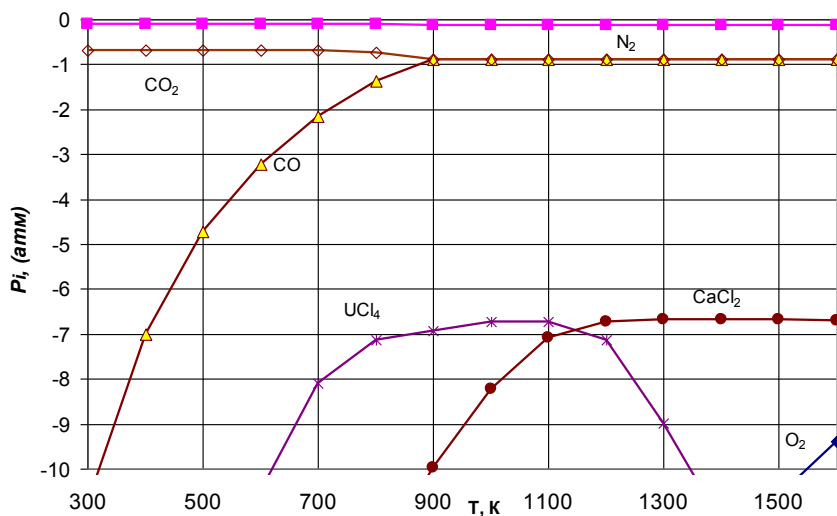


Рис. 2 Состав газовой фазы при сжигании радиоактивного графита в атмосфере воздуха

При температуре выше 900 К основные компоненты газовой фазы – N_2 ($p \sim 0.98$ атм.), CO_2 и CO ($p \sim 10^{-1}$ атм.).

Распределение хлора по фазам – см. рис. 3.

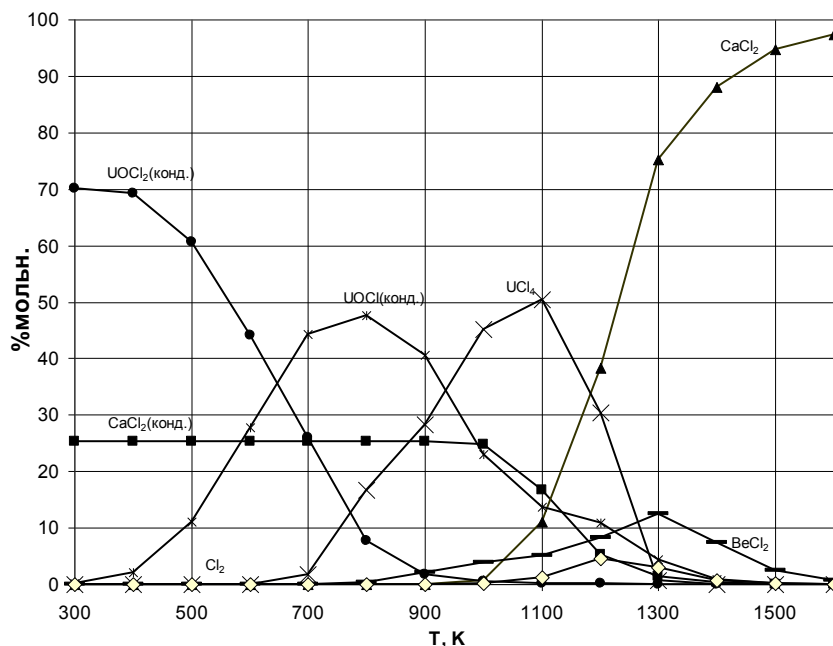


Рис. 3 Распределение хлора по фазам

При температуре 300 К основная часть хлора (70 мол. %) находится в виде конденсированного $UOCl_2$. При повышении температуры от 300 до 400 К процентное содержание $UOCl_2$ практически не изменилось. Дальнейшее повышение температуры от 400 до 1000 К приводит к исчезновению $UOCl_2$.

В месте исчезновения $UOCl_2$ образуется $CaCl_2$ и с повышением температуры от 1000 до 1600 К процентное содержание $CaCl_2$ повышается с 0 до 98 %.

Так же хлор при температуре от 300 до 1000 К находится в состоянии конденсированного $CaCl_2$ (25 мол. %). При повышении температуры от 1000 до 1300 К процентное содержание конденсированного $CaCl_2$ уменьшается и становится равным 0.

В температурном интервале 300-1400 К хлор находится в виде конденсированного $UOCl$. От 300 до 800 К процентное содержание $UOCl$ увеличивается с 0 до 48%, а при увеличении температуры от 800 до 1400 К уменьшается до 0.

От 600 К наблюдаем появление UCl_4 , процентное содержание которого увеличивается с 0 до 50 мол. % и уменьшается при температуре 1100 К до 0 при 1300 К.

При температуре 800 К образуется Cl_2 . Он увеличивается до 12 мол. % при температуре 1300 К и уменьшается до 2 мол. % при температуре 1600 К.

И последний элемент, образующийся в распределении хлора по фазам - $BeCl_2$, при температуре 1000 К (увеличивается до 5 мол. % при 1200 К и исчезает при 1400 К).

Наряду с успешно применяемыми нами теоретическими и экспериментальными методами [16-57], термодинамическое моделирование позволяет оценить поведение веществ при нагреве в равновесной системе и на основании этой оценки дать заключение о пожаровзрывоопасности и опасных факторах пожара.

Библиографический список

1. Скачек М.А. Обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС. М. : Издат. дом МЭИ, 2007. 448 с.
2. Микеев А.К. Противопожарная защита АЭС. М. : Энергоиздат, 1990. 432 с.
3. Криницын А.П., Пазухин Э.М. Исследование образцов графита из 4-го блока Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1994. Т. 36. № 6. С. 522–528.
4. Yang H.-C., Eun H.-C., Lee D.-G. Behavior of radioactive elements during thermal treatment of nuclear graphite waste. Thermodynamic model analysis // J. of nuclear science and technology, 2005. 42. № 10. P. 869–876.
5. Барбин Н.М., Терентьев Д.И., Пеиков А.В., Алексеев С.Г. Сравнительный термодинамический анализ процессов переработки радиоактивного графита сжиганием в атмосфере воздуха и окислением в солевом расплаве // Расплавы. 2013. № 4. С. 25–35.
6. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных системах. М. : Металлургия, 1994. 352 с.
7. Моисеев Г.К., Вяткин Г.П., Барбин Н.М. Применение термодинамического моделирования для изучения взаимодействия с участием ионных расплавов. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2002. 116 с.
8. Барбин Н.М., Алексеев С.Г., Алексеев К.С. Применение термодинамического моделирования для изучения полимеров при нагревании // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 8. С. 245–247.
9. Барбин Н.М., Казанцев Г.Ф., Ватолин Н.Л. Переработка вторичного свинцового сырья в ионных солевых расплавах. Екатеринбург : УрО РАН, 2002. 180 с.
10. Barbin N., Terentiev D., Alekseyev S., Barbina T. Thermodynamic modeling of the Pb+Bi melt evaporation under various pressure and temperatures // Computational Materials Scienc. 2013. V. 66. Pp. 28–33.
11. Терентьев Д.И., Барбин Н.М., Борисенко А.В., Алексеев С.Г. Термодинамическое исследование состава газовой фазы над расплавами системы Pb-Bi // Перспективные материалы. 2011. № 13. С. 859–864.
12. Терентьев Д.И., Барбин Н.М., Борисенко А.В., Алексеев С.Г. Состав и теплофизические свойства системы (Pb-Bi) – пар при различных условиях // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 23–38.
13. Barbin N.M., Terentiev D.I., Alekseyev S.G. Computer calculation for thermal behavior of $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-Li}_2\text{CO}_3$ melt // Journal of Engineering Thermo physics. 2011. Т. 20. № 3. Pp. 308–314.
14. Терентьев Д.И., Барбин Н.М., Борисенко А.В., Алексеев С.Г. Термодинамическое моделирование испарения расплавов Pb+Bi при различных давлениях // Химическая физика и мезоскопия. 2011. Т. 13. № 3. С. 350–355.
15. Барбин Н.М. Термодинамическое моделирование термического поведения расплавов $\text{Li}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ и $\text{CaCO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ //Химическая физика и мезоскопия. 2008. Т. 10. № 3. С. 354–360.
16. Алексеев С.Г., Барбин Н.М., Алексеев К.С., Орлов С.А. Связь показателей поджарной опасности с химическим строением. I. Алкалоны // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 5. С. 23–30.
17. Алексеев С.Г., Барбин н.М., Алексеев К.С., Орлов С.А. Связь показателей поджарной опасности с химическим строением. II. Кетоны (Часть 1) // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20. № 6. С. 8–15.

18. *Алексеев С.Г., Барбин Н.М., Алексеев К.С., Орлов С.А.* Температура вспышки. Часть II. Расчет через давление насыщенного пара* // *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 10. С. 21–35.
19. *Алексеев К.С., Барбин Н.М., Алексеев С.Г.* Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. VI. Альдегиды* // *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 9. С. 29–37.
20. *Алексеев С.Г., Алексеев К.С., Барбин Н.М.* Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. VIII. Сложные эфиры (Часть 1)* // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. № 1. С. 31–57.
21. *Алексеев К.С., Барбин Н.М., Алексеев С.Г.* Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. V. Карбоновые кислоты // *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 7. С. 35–46.
22. *Смирнов В.В., Алексеев С.Г., Барбин Н.М., Животинская Л.О.* Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. IX. Хлоралканы // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. № 4. С. 13–21.
23. *Смирнов В.В., Алексеев С.Г., Барбин Н.М., Калач А.В.* Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XI. Галогеналканы // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. № 8. С. 25–37.
24. *Алексеев С.Г., Алексеев К.С., Животинская Л.О., Барбин Н.М.* Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. X. Сложные эфиры (Часть 2) // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. № 5. С. 9–19.
25. *Алексеев С.Г., Барбин Н.М., Авдеев А.С., Пищальников А.В.* О взрывопожароопасности водочной продукции // *Пожаровзрывобезопасность*. 2009. Т. 18. № 2. С. 20–23.
26. *Алексеев С.Г., Пищальников А.В., Левковец И.А., Барбин Н.М.* О пожаровзрывоопасности водных растворов этанола // *Пожаровзрывобезопасность*. 2010. Т. 19. № 5. С. 31–33.
27. *Алексеев С.Г., Смирнов В.В., Алексеев К.С., Барбин Н.М.* Температура вспышки. Часть III. Методы расчета через температуру кипения // *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. Т. 23. № 3. С. 30–43.
28. *Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М., Тимашев С.А., Гурьев Е.С.* Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. II. РД 03-409-01 // *Пожаровзрывобезопасность*. 2011. Т. 20. № 1. С. 21–27.
29. *Алексеев С.Г., Смирнов В.В., Барбин Н.М.* Температура вспышки. Часть I. История вопроса, дефиниции, методы экспериментального определения* // *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 5. С. 35–41.
30. *Алексеев С.Г., Алексеев К.С., Смирнов В.В., Барбин Н.М.* Температура вспышки. Часть IV. Deskрипторный метод расчета // *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. Т. 23. № 5. С. 18–37.
31. *Рудаков О.Ю., Алексеев С.Г., Бердникова Н.В., Барбин Н.М., Калач А.В.* Пожаровзрывобезопасность хроматографической аналитической лаборатории // *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 1. С. 57–60.
32. *Алексеев С.Г., Барбин Н.М., Алексеев К.С., Орлов С.А.* Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. IV. Простые эфиры // *Пожаровзрывобезопасность*. 2011. Т. 20. № 9. С. 9–16.
33. *Смирнов В.В., Алексеев С.Г., Барбин Н.М.* Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XIV. Алкиламины // *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. Т. 23. № 9. С. 27–37.

34. Барбин Н.М., Кобелев А.М., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. Термодинамическое моделирование поведения радионуклидов при нагреве (сжигании) радиоактивного графита в парах воды // *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. Т. 23. № 10. С. 38–47.
35. Алексеев С.Г., Барбин Н.М., Смирнов В.В. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. VII. Нитроалканы // *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 12. С. 22–24.
36. Смирнов В.В., Алексеев С.Г., Барбин Н.М., Животинская Л.О. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XIII. Тиоспирты // *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. Т. 23. № 8. С. 15–25.
37. Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М., Тимашев С.А., Гурьев Т.С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. I. РБ Г-05-039-96 // *Пожаровзрывобезопасность*. 2010. Т. 19. № 5. С. 37–47.
38. Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М., Гурьев Е.С. Сравнительный анализ методик прогнозирования последствий взрывов газопаровоздушных смесей // *Проблемы анализа риска*. 2013. Т. 10. № 4. С. 12–19.
39. Алексеев К.С., Алексеев С.Г., Барбин Н.М. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. Часть XXII. Диалкилкарбонаты // *Бутлеровские сообщения*. 2016. Т. 45. № 1. С. 93–100.
40. Алексеев С.Г., Кошелев А.Ю., Барбин Н.М. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XVI. А,Ю-Аминоспирты // *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. Т. 23. № 12. С. 13.
41. Алексеев С.Г., Кошелев А.Ю., Барбин Н.М., Спиридонов М.А. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XIX. Нитроацетаты // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т. 24. № 7. С. 17–7.
42. Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М., Тимашев С.А., Гурьев Е.С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VI. Т1ЧО-МЕТОДЫ (Часть 1) // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. № 7. С. 22–29.
43. Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М., Гурьев Е.С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VII. BST-МЕТОДЫ // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. № 12. С. 23–30.
44. Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М., Тимашев С.А., Гурьев Е.С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. III. СП 12.13130.2009 // *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 1. С. 33–38.
45. Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М., Тимашев С.А., Гурьев Е.С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. IV. ГОСТ Р 12.3.047-98* // *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 6. С. 34–37.
46. Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М., Тимашев С.А., Гурьев Е.С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. V. ПБ 09-540-03* // *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 8. С. 32–35.
47. Алексеев С.Г., Пищальников А.В., Барбин Н.М., Левковец И.А. Влияние внешних условий хранения водки на ее показатели пожаровзрывоопасности // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. № 3. С. 22–28.
48. Алексеев К.С., Барбин Н.М., Калач А.В., Калач Е.В. Применения дескрипторного метода QSPR для прогнозирования температуры вспышки спиртов // *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. Т. 23. № 1. С. 21–24.

49. *Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М., Гурьев Е.С.* Методы оценки взрывопожароопасности топливоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VIII. Сравнение методов Дорофеева. РД 03-409-01 и BST2 // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т. 24. № 3. С. 6–12.

50. *Barbin N.M., Terentiev D.I., Alexeev S.G., Barbina T.M.* Thermodynamic analysis of radioactive graphite reprocessing in air and oxidation in molten salt // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Т. 299. № 3. С. 1747–1757.

51. *Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М., Пищальников А.В., Орлов С.А., Уломский Е.Н.* Показатели пожаровзрывоопасности противовирусного препарата триазавирина и полупродуктов его синтеза // *Пожаровзрывобезопасность*. 2008. Т. 17. № 3. С. 46–48.

52. *Алексеев С.Г., Левковец И.А., Рыжков О.В., Артемьев Г.А., Барбин Н.М., Пищальников А.В., Котовская С.К.* Показатели пожаровзрывоопасности основных полупродуктов в синтезе антибактериального препарата левофлоксацина // *Пожаровзрывобезопасность*. 2010. Т. 19. № 5. С. 34–36.

53. *Алексеев С.Г., Левковец И.А., Рыжков О.В., Артемьев Г.А., Барбин Н.М., Пищальников А.В., Котовская С.К.* Показатели пожаровзрывоопасности антибактериального препарата левофлоксацина и его основных полупродуктов // *Пожаровзрывобезопасность*. 2011. Т. 20. № 1. С. 18–20.

54. *Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М., Пищальников А.В.* Выбор наиболее опасной ЛВЖ при категорировании помещений // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. № 9. С. 19–24.

55. *Алексеев С.Г., Мавлютова Л.К., Кошелев А.Ю., Алексеев К.С., Барбин Н.М.* Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XII. Алкилбензолы и диалкилбензолы // *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. Т. 23. № 6. С. 38–46.

56. *Алексеев С.Г., Кошелев А.Ю., Барбин Н.М.* Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XVIII. Алкильные производные аминметанола // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т. 24. № 2. С. 36–44.

57. *Алексеев С.Г., Гурьев Е.С., Барбин Н.М.* Еще раз о сравнении методик прогнозирования последствий взрывов топливно-воздушных смесей // *Проблемы анализа риска*. 2015. Т. 12. № 2. С. 56–70.