

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ВОЗГОРАНИЯ И ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОДА В ОБЪЕМАХ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АЭС

Ю.С. Юрьев, Н.М. Витушкина, А.А. Зайцев

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



В работе использована диаграмма Шапиро, на которой изображены области возгорания и детонации водородных смесей. При представлении границ этих областей и траектории процесса не в виде линий, а в виде полос определена вероятность этих процессов в ходе заполнения объемов защитных оболочек (ЗО) водородом при аварийном разрушении реактора.

Ключевые слова: водородная безопасность, диаграмма Шапиро, возгорание, детонация, АЭС.

Key words: hydrogen safety, Shapiro diagram, ignition, detonation, NPP.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Водородная безопасность контейнментов АЭС является одной из важнейших задач проектирования и эксплуатации оборудования в защитных оболочках. При максимальной проектной аварии (МПА) и запроектной аварии возможно такое развитие событий, когда в помещения контейнмента поступает большое количество водорода ~ 1000 кг и выше; максимальная скорость выхода ~ 0.5 кг/с; максимальная средняя концентрация ~ 30% (объемные доли) [1].

Генерация водорода в реакторе наступает в момент высокого разогрева твэлов (~1000°C – парциркуниевая реакция) и внутрикорпусных конструкций (сталь ~1500°C), некоторый вклад вносит радиолитический водород. На рисунке 1 представлена расчетная кинетика накопления водорода при определенных консервативных предположениях [2].

Граница концентраций возможного воспламенения водородсодержащей смеси из воздуха (А), пара (V) и водорода (H), установленная экспериментальным и расчетным путем, представлена на диаграмме Шапиро (рис. 2а) [2], где H_{\min} – H_{\max} – граничные объемные относительные концентрации водорода в смеси с воздухом; V_{\min} – минимальная концентрация пара, выше которой воспламенение невозможно. На этом рисунке показана и траектория 3 процесса накопления в объеме контейнмента пара и водорода, который заканчивается в области воспламенения.

Задача оценки вероятности пересечения траекторией процесса границы опасной области сложна, поскольку

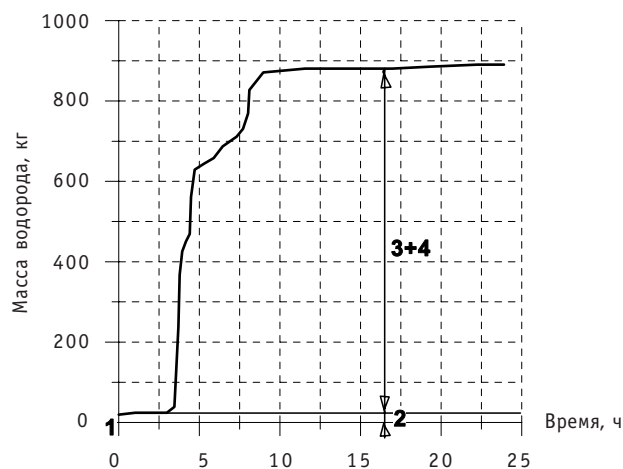


Рис. 1. Расчетная генерация водорода на АЭС с ВВЭР при МПА: 1 — начало МПА; 2 — радиолитический водород; 3 — парациркониевая реакция; 4 — окисление стальных конструкций

- положение граничной кривой неоднозначно в координатах A, H, V ; кроме того, воспламенение газовой смеси зависит еще и от абсолютного размера области, начальной температуры и концентрации капель тумана [2];

- вычисление траектории 3 по кодам различной детализации дает разные результаты (код КУПОЛ-М в сосредоточенных параметрах — ориентировочные, а код КУПОЛ-3D — более точные результаты [3]).

Поэтому задачу пересечения граничной кривой $H_{\min} - V_{\min} - H_{\max}$ с траекторией 3 следует рассматривать не как детерминистическую, а как вероятностную.

Вероятностный подход к оценке результатов теплогидравлических расчетов применяется давно, а сейчас выходит на этап создания нормативных документов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

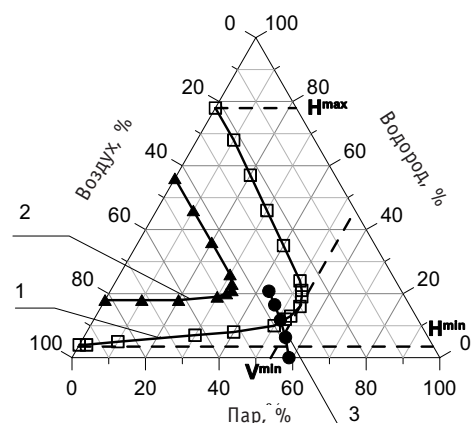
На рисунке 26 приведена диаграмма Шапиро с координатами характерных точек (1–9). Каждая точка внутри треугольника Шапиро имеет три координаты — относительные концентрации (A, V, H). Поскольку $A + V + H = 1$, то эта диаграмма переопределена и ее можно однозначно перестроить в модифицированный декартовый вариант в координатах $(H - A)$, $0 \leq A \leq 1$, $0 \leq H \leq 1$; $V = 1 - (A + H)$ (рис. 2в).

Характерные точки (объемные концентрации)

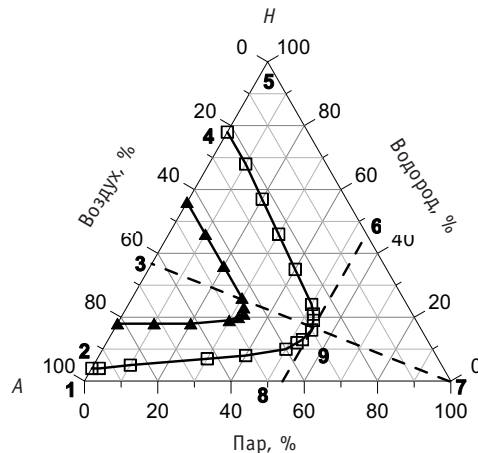
1. $A = 1, H = 0, V = 0$; $A + H + V = 1$
2. $A_F = 0,96, H_F = 0,14, V = 0$; $H_F = 1 - A_F$
3. $A_D = 0,63, H_D = 0,37$; $V = 0, H_D = 1 - A_D$
4. $A_F = 0,22, H_F = 0,78, V = 0, H_F = 1 - A_F$
5. $A = 0, H = 1, V = 0$
6. $A = 0, H_V = 0,45, V_F = 1 - H_V = 0,55$
7. $A = 0, H = 0, V = 1$
8. $A_V = 1 - V_F = 0,45$; $H = 0$; $V_F = 0,55$
9. $A_V = 0,30, H_V = 0,15, V_F = 0,55, A_V + H_V + V_F = 1$.

На рисунке 26 в главных координатах $(H - A)$ обозначены те же характерные точки с их координатами:

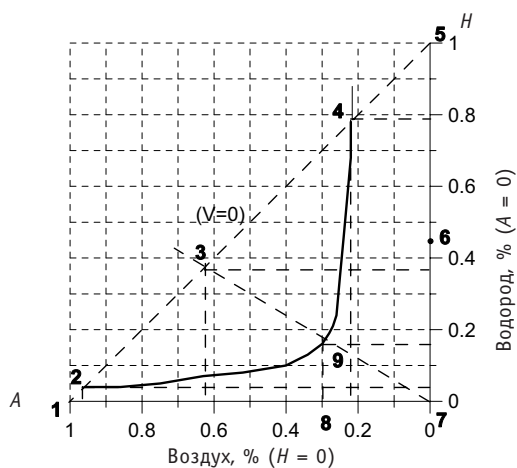
$A = 1$; A_F ; A_D ; A_V ; A^F ; 0
 $H = 1$; H_F ; H_D ; H_V ; H^F ; 0.



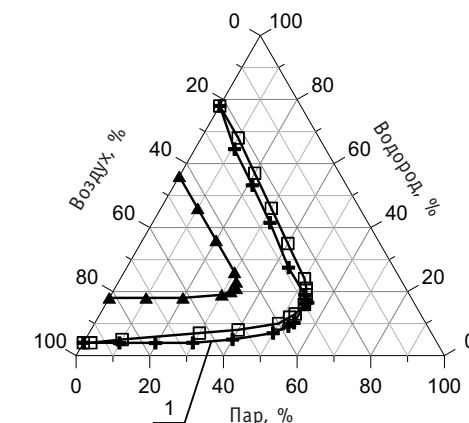
а) 3 – траектория процесса накопления в объеме контейнента пара и водорода



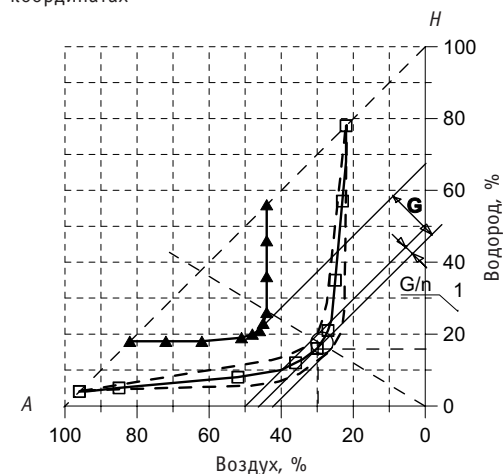
б) 1-9 – координаты характерных точек 1-9



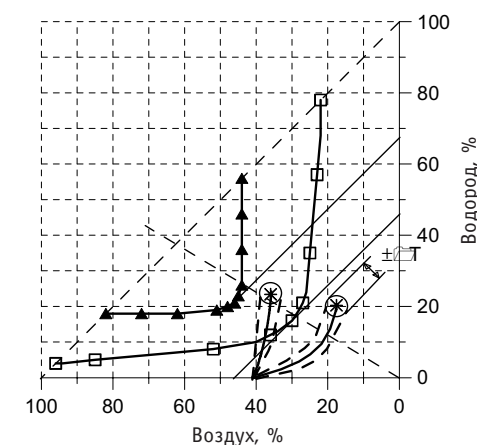
в) модифицированная диаграмма в декартовых координатах



г) сопоставление кривой Шапиро с расчетом по «формуле гиперболы» (1)



д) 1 – ширина граничной полосы



е) расчетная неопределенность траектории процесса

Рис. 2. Диаграмма Шапиро: 1 – граница воспламенения; 2 – граница детонации; 3 – траектория процесса накопления пара и водорода в контейменте

В начале декартовых координат (0) имеем $A = H = 0$; $V = 1$.

Используя модифицированный график рис. 2в можно описать граничную кривую в виде гиперболы:

$$(H+h)(A+a) = A_v H, \quad (1)$$

где h и a – параметры асимптот гиперболы. Они определяются методом наименьших квадратов.

На рисунке 2г расчетная граничная кривая, полученная по формуле (1), сопоставляется с кривой Шапиро (рис. 2а).

Кроме «формулы гиперболы» (1) могут быть рассмотрены и другие, более громоздкие корреляции, связанные, например, с формулой скорости химической

реакции W ; $\left[H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2 O \right]$, а именно,

$$W = W_0 e^{-\frac{Q}{RT}} = \frac{P_{H_2 O} B}{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}} = \frac{B \cdot v_{H_2} \cdot v_{O_2}^{1/2}}{v_{H_2 O}}, \quad (2)$$

где p , v – парциальные давления и объемы компонентов.

В числителе формулы (2) просматривается гиперболическая зависимость вида $[H \cdot O^{1/2}]$. Однако для наших целей эти уточнения необязательны.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ПОЛОСА ГРАНИЧНОЙ КРИВОЙ

Граничную кривую области воспламенения по рис. 2а–г следует считать средним значением, математическим ожиданием. Вокруг этой кривой необходимо установить полосу вероятностных отклонений. Они связаны с экспериментальными и расчетными погрешностями, а также с учетом реальных особенностей воспламенения для разных объемов, температур, способов поджога. Масштабом этих вероятностных отклонений может служить диапазон концентраций от воспламенения до детонации.

На рисунке 2д показаны эти области и обозначены расстояния между границами $G = 0.2 - 0.15 = 0.05$. Целесообразно ввести диапазон концентраций вероятностной полосы размером

$$\frac{G}{n} = \frac{0.05}{10} = \pm 0.005.$$

Тогда вероятностное положение граничной кривой будет выражаться формулой

$$(H+h) \cdot (A+a) = (A_v \pm \Delta A_v) \cdot (H_v \pm \Delta H_v), \quad (3)$$

$$\text{где } \Delta A_v = \frac{2}{\sqrt{5}} \left(\frac{G}{n} \right); \Delta H_v = \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\frac{G}{n} \right).$$

«Верхнее» положение, которое определяет возможность касания траектории, есть

$$(H+h) \cdot (A+a) = A_v H_v \left(1 + \frac{40}{3\sqrt{5}} \frac{G}{n} \right). \quad (4)$$

«Нижнее» положение, которое определяет возможность касания траектории, есть

$$(H+h) \cdot (A+a) = A_v H_v \left(1 - \frac{40}{3\sqrt{5}} \frac{G}{n} \right). \quad (5)$$

ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОПИСАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПРОЦЕССА

Траекторию процесса в координатах ($A - V - H$) по рис. 2а можно рассматривать как среднее значение, а следовательно, и предполагать возможность ее вероятностного отклонения вследствие неопределенности замыкающих функций и коэффициентов в расчетном коде, различной степени детализации (нодализации) области решения, погрешности математической модели. На рисунке 2е показаны эти эффекты. Таким образом, детерминистический расчет средней траектории процесса дополняется оговоренным вероятностным разбросом в пределах $\pm \Delta T$.

ПЕРЕСЕЧЕНИЕ ПОЛЕЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Сравнивая рис. 2д и рис. 2е, получаем разные случаи взаимного расположения полос неопределенности граничной кривой и траектории. На рисунке 3 показаны семь случаев пересечения конечных «пятен» траектории с «полосой» граничной кривой. При различной глубине проникновения «пятна» траектории в область граничной «полосы» реализуется разная вероятность воспламенения: от $\Gamma = 0$ (точки 1, 2) через $\Gamma = 0,25$ (точка 3), $0,5$ (точка 4) и $0,75$ (точка 5) к 100-процентной вероятности (точки 6 и 7). Точка 2 характеризует минимальный запас до воспламенения, равный $Z \leq \frac{G}{n} + \Delta T$, который учитывает неопределенность положения как «полосы» граничной кривой, так и «пятна» расчетной траектории.

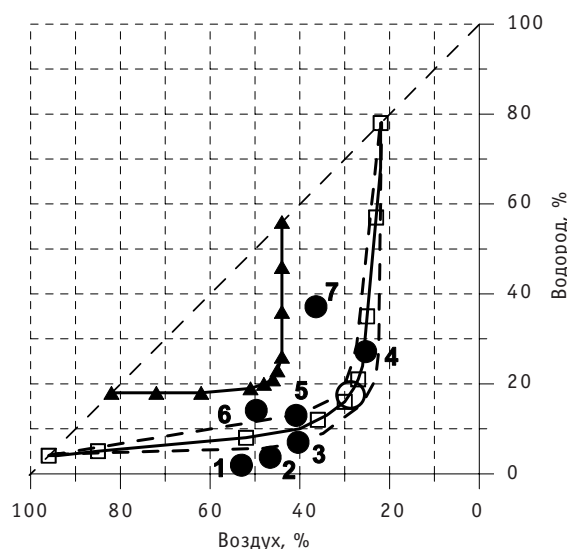


Рис. 3. Вероятность воспламенения Γ в семи характерных конечных точках траектории: 1 – $\Gamma = 0$; 2 – $\Gamma = 0$; 3 – $\Gamma = 0,25$; 4 – $\Gamma = 0,5$ (среднее значение на граничной кривой); 5 – $\Gamma = 0,75$; 6 – $\Gamma = 1,0$; 7 – $\Gamma = 1,0$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вероятностный подход к определению запаса (времени) до горения или детонации водородной смеси в объеме 30 при МПА позволяет выработать более обоснованные требования к системе и оборудованию водородной безопасности АЭС.

Литература

1. Безлепкин В.В., Голиков Ю.А., Кухтевич И.В., Лукьянов А.А., Смирнов В.В., Соловьев В.П. Обеспечение водородной безопасности АЭС с ВВЭР-1000// Теплоэнергетика. – 2002. – №5. – С. 5-12.

2. Hydrogen Behavior and Mitigation in Water-Cooled Nuclear Power Reactors. Edited by E. Della Loggia. Proceedings of a workshop held in Brussels (Belgium) from 4 to 8 March 1991. EUR 14039 EN, 1992.

3. Витушкина Н.М., Лукьянов А.А., Шаньгин Н.Н. Моделирование пространственных эффектов при конденсации пара в модельном контейнменте с использованием кода КУПОЛ-3D // Тепло-энергетика. – 2006. – № 9. – С. 73-77.

Поступила в редакцию 21.06.2010

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.548

The System of Irradiated Fuel Elements Nondestructive Examination for Inspection and Reconstitution Stand of WWER Assemblies \S.V. Pavlov, S.S. Sagalov, S.V. Amosov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 8 illustrations. – References, 6 titles.

The description of the nondestructive diagnostic system of irradiated fuel elements, enclosed to inspection and reconstitution stand of WWER-1000 assemblies, is presented. Principles, as well as technique and programmable realization of ultrasound leakage test and pulsed eddy current defectoscopy of fuel elements are considered.

УДК 621.039.58

Probability Estimation of Hydrogen Ignition and Detonation in the Containment Vessel \Yu.S. Yur'ev, N.M. Vitushkina, A.A. Zaitsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.

The Shapiro diagram is used for finding of ignition and detonation areas of hydrogen mixtures. The area boundaries and process trajectory are presented as the bands instead of the lines. This approach enables to determine the probability of these processes during the hydrogen filling of the containment vessel.

УДК 621.039.51

The Use of Supercritical Water Reactors in a Close Fuel Cycle \Yu.D. Baranaev, A.P. Glebov, A.V. Klushin, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 13 pages, 6 tables, 7 illustrations. – References, 7 titles.

Specifics of neutronics, thermal hydraulics and construction of the supercritical water reactors with thermal and fast neutron spectrum were investigated.

It is proved that reactors with thermal spectrum have conversion ratio about $CR \approx 0,7$ and that natural Uranium consumption in such a reactors could be decreased about 2 times (compared convention WWER-1000).

In the reactor with a fast spectrum this ratio is rather higher and will be reach to $CR = 0,9-0,95$. So, supercritical water reactor can operate by fuel self supply and future nuclear electricity power become more effective. The Thorium can be used in a supercritical water reactors with thermal and fast spectrum as in a Plutonium-Thorium or Uranium-Thorium fuel cycles without any fuel element construction changes. The problems of nuclear safety and fuel efficiency can be also solved in these fuel cycles.

УДК 621.039.534

Thermal Hydraulic Calculation of Medical Reactor MARS \A.A. Kazantsev, V.R. Anisovyan; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 12 titles.

The specialized medical reactor MARS is under design for neutron-capture therapy. Results of calculations of total hydraulic resistance of a reactor MARS between inlet and outlet pipes by CFD- code are presented for range of flow rates. Calculation of the accident with removing of one control rod from reactor is presented. Accident transient was calculated up to new safe steady state condition.

УДК 621.039.51

Principal Physical Advantages from Applying Radiogenic Lead as a Coolant of Nuclear Reactors \G.G. Kulikov, A.N. Shmelev, V.A. Apse, V.V. Artisyuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 16 titles.

The paper presents preliminary analysis of some advantages, which could be attained from the use of radiogenic lead, i.e. lead extracted from uranium and thorium ores, as a coolant of power nuclear reactors. The paper highlights that radiogenic lead can be used to improve operation safety and intensify breeding fuel. In addition, nuclear reactors cooled by radiogenic lead could be successfully used for hydrogen (or some other artificial fuel types) production, for generation of high-temperature technological heat and for neutron transmutation of radioactive wastes with low neutron capture cross-sections.