

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 2. С. 9–17
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(2):9-17

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.02.9-17>

Математическое моделирование натекания водорода в гермзоне реакторного здания АЭС с ВВЭР-1200

Сергей Викторович Пузач ✉, Ольга Сергеевна Лебедченко

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Закономерности образования водородно-воздушных смесей при натекании водорода в верхнюю часть помещения большого объема в начальные моменты времени недостаточно изучены. Поэтому определение закономерностей образования локальных взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в нижнюю часть подкупольного пространства реакторного здания является актуальным.

Цели и задачи. Целью статьи является теоретическое исследование возникновения локальных пожаро- и взрывоопасных зон водородно-воздушной смеси, образующейся при натекании водорода в гермзоне реакторного здания, для обоснования параметров концентрационных датчиков системы контроля концентрации водорода. Для ее достижения разработана зонная математическая модель расчета концентраций водорода в помещении. Проведены численные эксперименты по определению закономерностей образования водородно-воздушных смесей.

Теоретические основы. Обобщенное трехмерное нестационарное дифференциальное уравнение законов сохранения массы, импульса и энергии используется для расчета локальных концентрационных полей водорода. Разработанная зонная модель позволяет определить концентрации водорода в конвективной колонке и в припотолочном слое.

Результаты и их обсуждение. Получены характерные поля массовых концентраций водорода в объеме подкупольного пространства. Показано, что на начальной стадии натекания водорода под перекрытием купольного пространства образуется зона припотолочного слоя, что подтверждает обоснованность применения зонной модели. Выполнено сравнение концентраций водорода, полученных по полевой и зонной моделям. Получены распределения массовых концентраций водорода по высоте конвективной колонки при различных числах Рейнольдса в отверстии натекания водорода. Показано, что концентрационные датчики водорода могут диагностировать аварийный режим натекания водорода в подкупольное пространство только в узкой области чисел Рейнольдса $Re = 900–5000$. Существует режим натекания ($Re = 3358$), при котором образуется максимальная объемная концентрация водорода в месте расположения концентрационных датчиков при максимальных размерах пожаро- и взрывоопасных зон водородно-воздушной смеси в помещении.

Выводы. Используемые датчики концентрации водорода в подкупольном пространстве реакторного здания АЭС с водно-водяными реакторами могут не обнаружить водород в верхней точке купола при пороге чувствительности в 2 % об. При этом по высоте конвективной колонки образуются водородно-воздушные смеси, находящиеся в пожаро- и взрывоопасных концентрационных пределах.

Ключевые слова: водородная безопасность; водородно-воздушная смесь; конвективная колонка; зонная математическая модель; трехмерная математическая модель; система контроля и удаления водорода

Для цитирования: Пузач С.В., Лебедченко О.С. Математическое моделирование натекания водорода в гермзоне реакторного здания АЭС с ВВЭР-1200 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 9–17. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.9-17

✉ Пузач Сергей Викторович, e-mail: puzachsv@mail.ru

Mathematical modelling of hydrogen leakage in containment area of NPP reactor building with VVER-1200

Sergey V. Puzach ✉, Olga S. Lebedchenko

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The patterns of hydrogen-air mixtures formation during the flow of hydrogen into the upper part of a large volume room in the initial moments of time are insufficiently studied. Therefore, the determination of

regularities of formation of local explosive and fire-hazardous hydrogen-air mixtures when hydrogen flows into the lower part of the dome space of the reactor building is important.

Goals and objectives. The purpose of the article is a theoretical study of occurrence of local fire and explosive zones of the hydrogen-air mixture generated during hydrogen leakage in the containment area of the reactor building in order to substantiate parameters of concentration sensors of the hydrogen concentration control system. To achieve it, a zone mathematical model of hydrogen concentration calculation in a pressurized room has been developed. Numerical experiments on regularities of hydrogen-air mixtures formation have been carried out.

Theoretical basis. The generalized three-dimensional non-stationary differential equation of the laws of conservation of mass, momentum and energy is used to calculate local hydrogen concentration fields. The developed zone model makes it possible to determine hydrogen concentrations in the convective column and in the ceiling layer.

Results and discussion. The characteristic fields of hydrogen mass concentrations in the volume of the dome space are obtained. It has been shown that at the initial stage of hydrogen leakage, a zone of the ceiling layer is formed under the ceiling of the dome space, which confirms the validity of the usage of the zone model. The hydrogen concentrations obtained by the field and zone models are compared. The distributions of hydrogen mass concentration along the convective column height at different Reynolds numbers in the hydrogen leakage hole have been obtained. It has been shown that hydrogen concentration sensors can detect a hydrogen leakage mode in the dome space only in a narrow area of Reynolds $Re = 900-5,000$. There is a leakage mode ($Re = 3,358$), in which the maximum hydrogen volume concentration is generated at the location of the concentration sensors at the maximum size of the fire and explosive hydrogen-air mixture zones in the room.

Conclusions. The hydrogen concentration sensors used in the dome space of the NPP reactor building with water-water reactors may not detect hydrogen at the top point of the dome at a sensitivity threshold of 2 % vol. In this case, in terms of the height of the convective column, hydrogen-air mixtures are formed within the fire and explosive concentration limits.

Keywords: hydrogen safety; hydrogen-air mixture; convective column; zone mathematical model; three-dimensional mathematical model; hydrogen control and removal system

For citation: Puzach S.V., Lebedchenko O.S. Mathematical modelling of hydrogen leakage in containment area of NPP reactor building with VVER-1200. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):9-17. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.9-17 (rus).

✉ Sergey Viktorovich Puzach, e-mail: puzachsv@mail.ru

Введение

Водородная безопасность является одним из ключевых элементов обеспечения безопасности на атомных электростанциях (АЭС) с водоохлаждаемыми реакторными установками (ВВЭР) [1–3].

Возможность горения водородно-воздушных смесей, угрожающих жизни людей, целостности защитной оболочки или работоспособности критичного для безопасности оборудования на АЭС с ВВЭР изложена, например, в работах^{1, 2, 3, 4} [4, 5].

При нормальной эксплуатации водород всегда присутствует в теплоносителе первого контура реакторной установки вследствие радиолиза, термолиза и других технологических процессов. Поэтому проблема обоснования водородной взрывобезопасности АЭС с ВВЭР является актуальной как для аварийных ситуаций, так и для условий нормальной эксплу-

атации. Места выделения водорода из теплоносителя первого контура РУ ВВЭР и случаи со взрывом водорода в оборудовании описаны В.М. Берковичем и др.⁴ В состоянии «остановка для ремонта» и в переходных режимах выделение газообразного водорода происходит, в том числе, и в полостях оборудования реакторной установки⁴.

В большинстве работ рассматривается только горение и детонация водородно-паровоздушной смеси^{5, 6} [5–13]. В ИБРАЭ РАН⁴ проведены экспериментальные и теоретические исследования физических аспектов процессов горения и детонации, исследования процессов стратификации и горения водородно-паровоздушных смесей в присутствии мелкодисперсных капель воды. В результате этих исследований проведено трехмерное компьютерное моделирование процесса стратификации водородно-паровоздушной смеси под защитной оболочкой АЭС.

Расчеты в работе⁴ выполнены для горения и детонации водорода в гермзоне реакторного здания. В то время как натекание водорода, образовавшегося при радиолизе воды, используемой в технологическом процессе, и возможность образования взрыво-

¹ Мартынов А.В., Рабенков Е.С. Выделение водорода из теплоносителя первого контура РУ ВВЭР-1000. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/>

² Рабенков Е.С. Выделение водорода из теплоносителя первого контура РУ ВВЭР-1000. URL: kms2014/documents/kms2014-010.pdf.

³ Водородная безопасность АЭС. Институт проблем безопасного развития атомной энергетики российской академии наук. URL: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/60/>

⁴ Беркович В.М., Давыдов Ю.Г., Ефанов А.Д., Лукьянов А.А., Мартынов П.Н. Методы и средства обеспечения водородной безопасности АЭС // Институт «Атомэнергoproject». М. ; Обнинск : ГНЦ ФЭИ. URL: <https://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2001/report2/misovba0.pdf>

⁵ Status report on hydrogen management and related computer codes. NEA/CSNI/R(2014)8 // Nuclear Energy Agency. URL: <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/csni-r2014-8.pdf>.

⁶ Barilo N. Hydrogen safety panel, safety knowledge tools, and first responder training resources. Hydrogen Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC, May 1, 2019. URL: [cs019_barilo_2019_o.pdf](https://www.oecd-neo.org/cs019_barilo_2019_o.pdf)

пожароопасных водородно-воздушных смесей до настоящего времени исследовались только в небольшом количестве работ, например в [14, 15].

На АЭС непрерывный контроль концентрации водорода во время проектных и запроектных аварий в возможных местах его скопления с представлением информации на блочный пульт управления (БПУ) и рабочий пульт управления (РПУ) осуществляет система контроля концентрации водорода, включающая концентрационные датчики водорода с пределом чувствительности 2 % об. Расположение и количество концентрационных датчиков принимается в зависимости от мест наибольшего скопления водорода в случае его натекания в гермзоне.

Закономерности образования взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в верхнюю часть помещения большого объема изучены достаточно широко [6]. Характерное время выравнивания концентраций водорода по всему объему помещения при этом составляет порядка нескольких часов. Однако динамика натекания в начальные моменты времени процесса недостаточно изучена. Поэтому определение закономерностей образования локальных взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в нижнюю часть подкупольного пространства реакторного здания является актуальным.

Целью работы является теоретическое исследование возникновения локальных пожаровзрывоопасных зон водородно-воздушной смеси, образующейся при натекании водорода в гермзону реакторного здания, для обоснования параметров концентрационных датчиков системы контроля концентрации водорода.

Теоретические основы

Обобщенное трехмерное нестационарное дифференциальное уравнение законов сохранения массы, импульса и энергии имеет вид [16]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \operatorname{div}(\rho w \Phi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \Phi) + S, \quad (1)$$

где τ — время, с;

ρ — плотность водородно-воздушной смеси, кг/м³;

Φ — зависимая переменная (проекции скорости на координатные оси, массовые концентрации компонентов газовой смеси O₂, H₂, N₂, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации);

w — скорость водородно-воздушной смеси, м/с;

Γ — коэффициент диффузии для Φ ;

S — источниковый член.

Начальные условия к уравнению (1) принимаются следующими:

- температуры газовой среды помещения, водорода, ограждающих конструкций помещения и наружного воздуха равны 293 К;
- давления в газовой среде помещения и наружном воздухе на уровне нижней отметки гермзоны равны 10⁵ Па;
- массовые концентрации: кислорода — $X_{O_2} = 0,23$; азота — $X_{N_2} = 0,77$; остальных газов — равны нулю.

Граничные условия к уравнению (1) на поверхностях ограждающих конструкций: условие «прилипания» [16] для уравнения неразрывности.

Уравнение (1) решено численно методом контрольных объемов [16] с использованием компьютерной программы⁷.

Распределения концентрации водорода в помещении, полученные с помощью уравнения (1), протестированы в работе [14] на экспериментальных данных [7]. Получено удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом.

Из-за больших размеров гермзоны и, соответственно, больших размеров конечно-разностной сетки расчет с использованием полевой модели требует значительных затрат машинного времени (порядка 180 ч).

Поэтому предложена более простая зонная модель, в которой помещение подобно зонной модели для расчета динамики пожара [17] разбивается на 3 зоны: зона конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода, зона припотолочного слоя, содержащая водородно-воздушную смесь, и зона чистого воздуха.

Дифференциальное уравнение для расчета распределения массовой концентрации водорода по высоте конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода в помещение, имеет вид [14]:

$$\begin{aligned} \frac{dX_h}{dz} = & \left[\frac{B}{X_h(\mu_a - \mu_h) + \mu_h} - \rho_a \right] \times \\ & \times \frac{g(d/2 + z \tan \gamma)^4}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h/X_h]} - \\ & - \frac{2 \tan \gamma [(\mu_a - \mu_h)X_h - \mu_h]}{(d/2 + z \tan \gamma)[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h/X_h]} + \\ & + \frac{2 p_0 (d/2 + z \tan \gamma)^3 \tan \gamma \cdot X_h^2}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h/X_h]}, \end{aligned} \quad (2)$$

где d — эквивалентный диаметр отверстия, через которое водород поступает в помещение, м;

⁷ Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238. Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара / Пузач С.В. от 08.12.2006 г.

X_h — средняя по поперечному сечению колонки на высоте z массовая концентрация водорода;

z — координата вдоль высоты конвективной колонки, отсчитываемая от уровня выходного сечения отверстия, через которое водород поступает в помещение, м;

B — размерный параметр, $\text{кг}^2/(\text{м}^3 \cdot \text{кмоль})$, $B = p_0 \mu_h \mu_a / (R_\mu T)$;

μ_a , μ_h — молекулярные массы воздуха и водорода соответственно, кг/кмоль ;

ρ_a — плотность воздуха, кг/м^3 ;

g — ускорение свободного падения, м/с^2 ;

γ — угол полураскрытия конвективной колонки, град;

A — размерный параметр, $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль/с}^2$, $A = G_h^2 / (\pi^2 B)$;

p_0 — давление воздуха на высоте $z = 0$, Па;

G_h — массовый расход водорода, поступающего через отверстие в помещение, кг/с ;

T — температура в помещении, К;

R_μ — универсальная газовая постоянная, $\text{Дж/(кмоль} \cdot \text{К)}$.

Распределения концентрации водорода по высоте конвективной колонки, полученные с помощью уравнения (2), протестированы в работе [14] на экспериментальных данных [7]. Получено удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом.

Для расчета параметров в зоне припотолочного слоя аналогично зонной модели для расчета динамики пожара решается уравнение закона сохранения массы:

$$\frac{d(\rho_c V)}{d\tau} = G_k, \quad (3)$$

где ρ_c — средняя плотность водородно-воздушной смеси в припотолочном слое, кг/м^3 ;

V — объем зоны припотолочного слоя, м^3 ;

G_k — расход газовой смеси в поперечном сечении конвективной колонки на высоте нижней границы припотолочного слоя z_k , кг/с .

Массовый расход G , кг/с , водородно-воздушной смеси, проходящий через поперечное сечение конвективной колонки на высоте z , равен:

$$G = G_h + G_a, \quad (4)$$

где G_a — массовый расход воздуха, подмешивающегося в конвективную колонку до высоты z , кг/с .

Массовый расход G можно также представить в виде:

$$G = G_h + X_h, \quad (5)$$

где X_h находится из уравнения (2).

Объем зоны припотолочного слоя равен:

$$V = \int_{z_k}^H F dz, \quad (6)$$

где H — высота, отсчитываемая от уровня выходного сечения отверстия, через которое водород поступает в помещение, до максимально высокой точки купола гермзоны, м;

F — переменная площадь поперечного сечения гермзоны, м^2 .

Интегро-дифференциальное уравнение для определения скорости опускания нижней границы припотолочного слоя после преобразования уравнения (3) с учетом уравнений (2), (5) и (6) имеет вид:

$$\frac{d}{d\tau} \left(\rho \int_{z_k}^H F dz \right) = G_k. \quad (7)$$

Высота нижней границы припотолочного слоя в различные моменты времени определяется из численного решения уравнения (7) методом итераций с помощью разработанной компьютерной программы на языке программирования Fortran.

Компьютерные программы для решения полевой модели (уравнение (1)) и расчета распределения массовой концентрации водорода по высоте конвективной колонки (уравнение (2)) верифицированы в работе [14] на экспериментальных данных [7].

Исходные данные для проведения численного эксперимента

Модельная задача решена для случая натекания водорода в подкупольное пространство гермзоны реакторного здания АЭС на отметке +26,300 м из-под крышки реактора в соответствии с данными².

Внешний вид подкупольного пространства гермзоны АЭС с ВВЭР и место натекания водорода представлены на рис. 1.

Результаты численных экспериментов и их анализ

Расчеты по полевой модели и предложенной зонной модели проводились для эквивалентного диаметра отверстия натекания водорода $d = 1$ м и расхода водорода $G_h = 0,00116$ кг/с ⁸.

На рис. 2 представлены схемы течения и поля массовых концентраций водорода в продольном сечении, проходящем через место истечения водорода в подкупольном пространстве.

Координаты x , y , z направлены вдоль длины, ширины и высоты подкупольного пространства реакторного здания выше отметки +26,300 м соответственно.

⁸ Козлов Д.И., Константинов С.А., Мальцев М.Б., Пересадыко В.Г., Проклов В.Б., Пылёв С.С. Обеспечение локализуемых функций защитной оболочки НВ АЭС-2 (АЭС-2006) при ЗПА с течами из реакторной установки В-392М // ФГУП «Атомэнергопроект». М. : ИПБ ЯЭ РНЦ «Курчатовский Институт». URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/documents/f128.pdf>

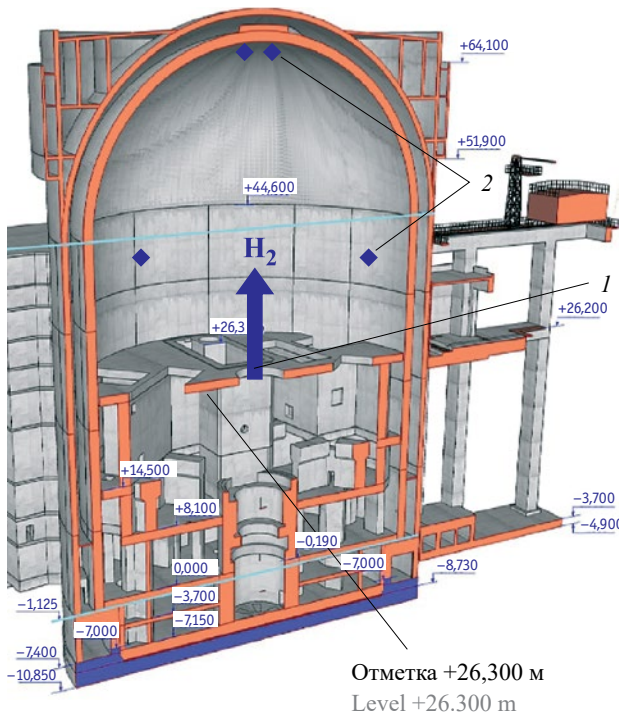


Рис. 1. Подкупольное пространство гермзоны АЭС с ВВЭР: 1 — место возможного поступления водорода в гермзону; 2 — датчики системы контроля концентрации водорода

Fig. 1. Dome space of the containment area of NPP with VVER: 1 — place of possible hydrogen supply to the containment area; 2 — sensors of hydrogen concentration control system

Из рис. 2 видно, что на начальной стадии натекания водорода под куполом гермзоны образуется припотолочный слой (водородно-воздушная смесь) с достаточно четко выделенной нижней границей. Поэтому предложенное допущение в разработанной зонной модели об образовании зоны припотолочного слоя адекватно физической картине натекания водорода в помещение большого объема. При этом параметры в конвективной колонке практически не меняются по времени процесса.

Расчет распределения объемных концентраций водорода X_{ho} по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия представлен на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что расчет объемных концентраций водорода с использованием предложенной зонной модели и полевой модели показал удовлетворительную сходимость при высоте, большей 4 м.

Динамика опускания нижней границы припотолочного слоя над конвективной колонкой, образовавшейся при натекании водорода в подкупольное пространство, показана на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что расчет высоты нижней границы припотолочного слоя с использованием предложенной зонной модели распространения водорода в подкупольном пространстве и полевой модели показал удовлетворительную сходимость. Отличие вышесказанной высоты, рассчитанной по разным моделям,

обусловлено тем, что в зонной модели пренебрегаем работой расширения, совершаемой водородно-воздушной смесью в конвективной колонке.

Численные эксперименты по влиянию числа Рейнольдса в отверстии натекания водорода на распределение концентраций водорода по высоте конвективной колонки проводились с использованием зонной модели для отверстий с диапазоном изменения диаметров $d = 0,01–1$ м при расходе $G_h = 0,00116$ кг/с.

Число Рейнольдса определялось как:

$$Re = \frac{\rho_h w d}{\mu}, \quad (8)$$

где ρ_h — плотность водорода в отверстии истечения водорода, кг/м³;

w — средняя скорость течения в отверстии истечения водорода, м/с;

μ — коэффициент динамической вязкости водорода при температуре 293 К и давлении 10^5 Па, $\mu = 8,8 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·с).

Произведение средней скорости на плотность водорода в уравнении (8) находится из величины расхода натекания водорода:

$$G_h = \rho_h w \frac{\pi d^2}{4}. \quad (9)$$

С учетом уравнений (8) и (9) числа Рейнольдса равны:

- при $d = 1$ м: $Re = 167,9$ (ламинарный режим течения);
- при $d = 0,1$ м: $Re = 1679$ (ламинарный режим течения);
- при $d = 0,01$ м: $Re = 16\,790$ (турбулентный режим течения).

Расчет распределения концентраций водорода по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия представлен на рис. 5.

Обозначения на рис. 5: НКПГ, ВКПГ — нижний и верхний концентрационные пределы горения; НКПВ, ВКПВ — нижний и верхний концентрационные пределы взрыва.

Из рис. 5 видно, что наиболее опасным случаем является натекание водорода через отверстие с $d = 0,1$ м. В этом случае пожаро- и взрывоопасная водородно-воздушная смесь занимает почти весь объем конвективной колонки.

На рис. 6 приведены зависимости высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное пространство.

На рис. 7 представлена зависимость объемной концентрации водорода X_{hc} в верхней точке купола (место расположения концентрационных датчиков водорода) от числа Рейнольдса.

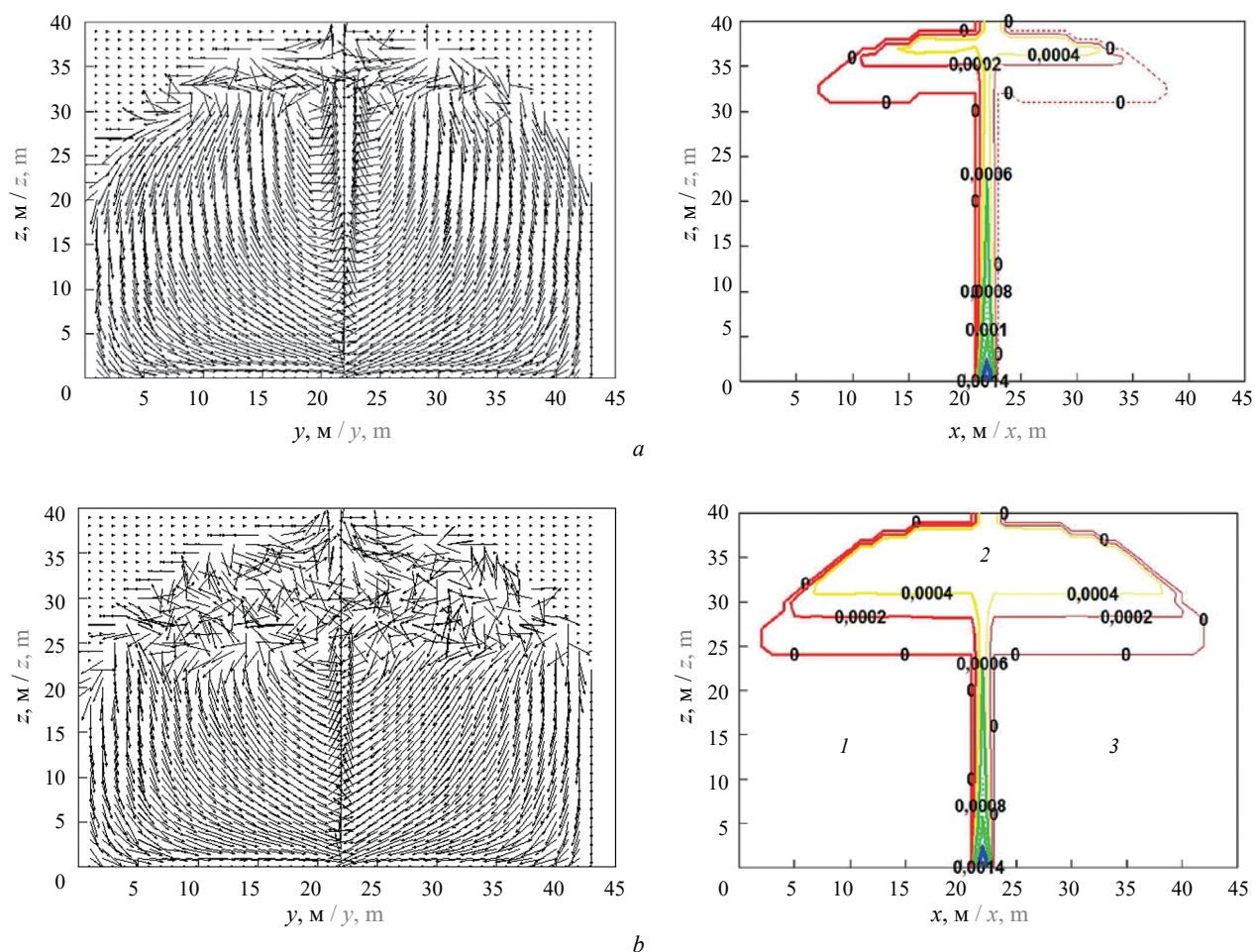


Рис. 2. Схемы течения и поля массовой концентрации водорода в вертикальном сечении, проходящем через место натекания водорода: *a* — через 10 мин от начала истечения водорода; *b* — через 1 ч; 1 — зона конвективной колонки; 2 — зона припотолочного слоя; 3 — зона чистого воздуха

Fig. 2. Flow patterns and fields of mass concentration of hydrogen in vertical section passing through the place of hydrogen leakage: *a* — in 10 minutes from the beginning of hydrogen outflow; *b* — in 1 hour; 1 — convective column zone; 2 — the zone of the ceiling layer; 3 — clean air zone

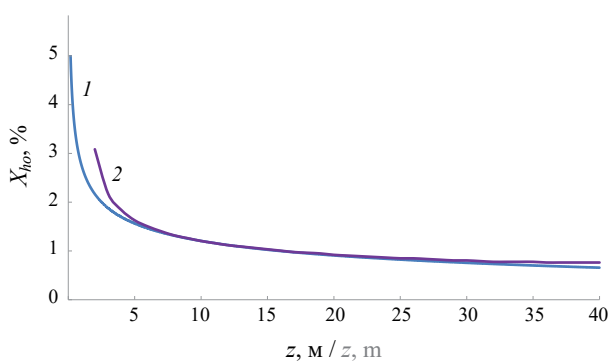


Рис. 3. Распределения объемных концентраций водорода по высоте конвективной колонки при $d = 1,0$ м и $G_h = 0,00116$ кг/с: 1 — зонная модель; 2 — полевая модель

Fig. 3. Distributions of hydrogen volume concentrations by convective column height at $d = 1.0$ m and $G_h = 0.00116$ kg/s: 1 — zone model; 2 — field model

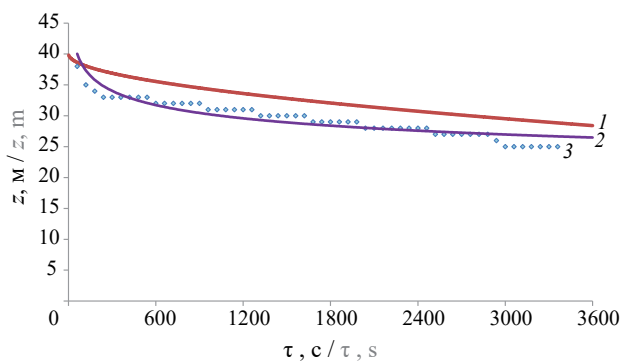


Рис. 4. Зависимость высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное пространство при $d = 1,0$ м и $G_h = 0,00116$ кг/с: 1 — расчет по зонной модели; 2 — расчет по полевой модели; 3 — линия тренда значений, полученных по полевой модели

Fig. 4. The dependence of the height of the lower boundary of the ceiling layer on the time from the beginning of hydrogen leakage into the dome space at $d = 1.0$ m and $G_h = 0.00116$ kg/s: 1 — calculated according to the zone model; 2 — calculation from the field model; 3 — trend line of field model values

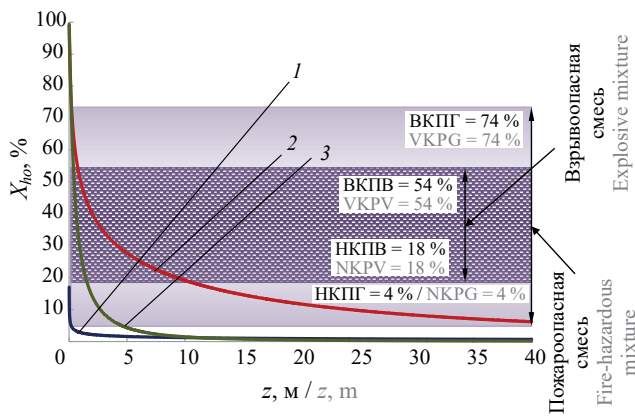


Рис. 5. Распределения объемных концентраций водорода по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия: 1 — $d = 1$ м; 2 — 0,1 м; 3 — 0,01 м

Fig. 5. Distributions of hydrogen volume concentrations by the height of the convective column for the different diameters of the hole: 1 — $d = 1$ м; 2 — 0.1 м; 3 — 0.01 м

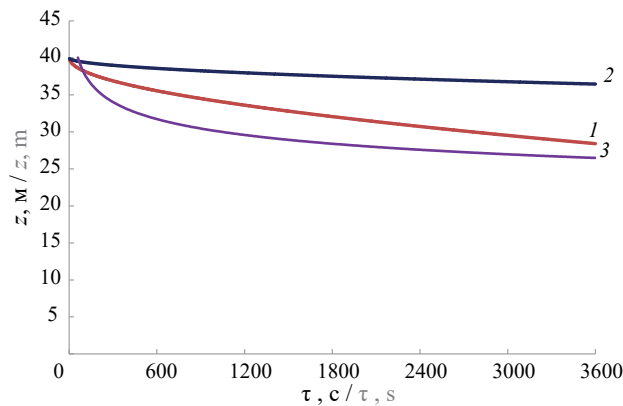


Рис. 6. Зависимости высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное пространство для различных диаметров отверстия: расчет по зонной модели: 1 — $d = 1$ м; 2 — 0,1 м; 3 — 0,01 м

Fig. 6. Dependence of the height of the lower boundary of the ceiling layer on the time from the beginning of hydrogen leakage into the dome space for different hole diameters: calculation according to the zone model: 1 — $d = 1$ м; 2 — 0.1 м; 3 — 0.01 м

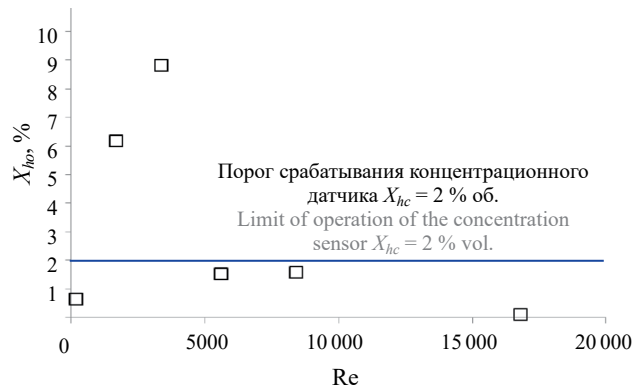


Рис. 7. Зависимость объемной концентрации водорода в верхней точке купола (место расположения концентрационных датчиков водорода) от числа Рейнольдса

Fig. 7. Dependence of the volume concentration of hydrogen in the upper point of the dome (location of hydrogen concentration sensors) on the Reynolds number

Из рис. 7 видно, что концентрационные датчики водорода могут диагностировать аварийный режим натекания водорода в подкупольное пространство только в узкой области чисел Рейнольдса $Re = 900-5000$.

Кроме того, существует режим натекания ($Re = 3358$), при котором образуется максимальная объемная концентрация водорода в месте расположения концентрационных датчиков при максимальных размерах пожаро- и взрывоопасных зон в водородно-воздушной смеси.

Выводы

Проведенные численные эксперименты показали, что используемые датчики концентрации водорода в подкупольном пространстве реакторного здания АЭС с ВВЭР могут не обнаружить водород в верхней точке купола при пороге чувствительности в 2 % об. При этом по высоте конвективной колонки образуются водородно-воздушные смеси, находящиеся в пожаро- и взрывоопасных концентрационных пределах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кириллов И.А., Харитонов Н.Л., Шарафутдинов Р.Б., Хренников Н.Н. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 2 (48). С. 1–12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29680571>
2. International Atomic Energy Agency (IAEA). Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors // IAEA-TECDOC-1196. Vienna, 2001.
3. Shapiro Z.M., Moffette T.R. Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accident, WAPD-SC-545 // Westinghouse Electric Corp. Bettis Plant, Pittsburgh, 1957; The Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants, WASH-740 // Atomic Energy Commission. 1957.
4. Payot F., Reinecke E., Morfin F., Sabroux J.C., Meynet N., Bentaib A., et al. Understanding of the operation behaviour of Passive Autocatalytic Recombiner (PRA) for hydrogen mitigation in realistic containment conditions during a severe Light Water Nuclear Reactor (LWR) accidents // Nuclear Engineering and Design. 2012. Vol. 248. Pp. 178–196. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.03.042
5. Shukla V., Ganju S., Varma S., Sengupta S., Maheshwari N.K. Affect of recombiner location on its

- performance in closed containment under dry and steam conditions // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Issue 47. Pp. 25957–25973. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.015
6. Шебеко Ю.Н., Келлер В.Д., Еременко О.Я., Смолин И.М.. Закономерности образования и горения локальных водородовоздушных смесей в большом объеме // *Химическая промышленность*. 1988. № 12. С. 24–27.
7. Шевяков Г.Г., Савельева Н.И. Распространение и горение струи водорода в открытой атмосфере // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2004. № 1 (9). С. 23–27.
8. Rubtsov N.M., Seplyarskii B.S. Concentration limits of combustion in rich hydrogen–air mixtures in the presence of inhibitors // *Mendeleev Communications*. 2010. Vol. 20. Issue 5. Pp. 296–298. DOI: 10.1016/j.mencom.2010.09.020
9. Кириллов И.А., Симоненко В.А., Харитонов Н.Л. Проблемы нормативного, экспериментального и расчетно-теоретического обеспечения безопасности водородной энергетики // *Российские нанотехнологии*. 2020. Т. 15. № 3. С. 402–414. DOI: 10.1134/S1992722320030061
10. Пантелеев В.А., Кириллов И.А. Метод описания сценариев каскадных и межсистемных аварий с учетом вероятностных факторов // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2019. № 5. С. 53.
11. Gharari R., Kazeminejad H., Mataji Kojouri N., Hedayat A. A review on hydrogen generation, explosion and mitigation during severe accidents in light water nuclear reactors // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. Issue 4. Pp. 1939–1965. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.174
12. Rozen A. Simulation of start-up behaviour of a passive autocatalytic hydrogen recombiner // *Nukleonika*. 2018. Vol. 63. Issue 2. Pp. 27–41. DOI: 10.2478/nuka-2018-0004
13. Dehjourian M., Sayareh R., Rahgoshay M., Jahanfarnia G., Shirani A. Investigation of a hydrogen mitigation system during large break loss-of-coolant accident for a two-loop pressurized water reactor // *Nuclear Engineering and Technology*. 2016. Vol. 48. Issue 5. Pp. 1174–1183. DOI: 10.1016/j.net.2016.04.002
14. Пузач С.В., Лебедченко О.С. Расположение взрыво- и пожароопасных участков водородно-воздушной смеси по высоте конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода в помещении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 1. С. 18–24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.18-24
15. Hoyes J.R., Iving M.J. CFD modeling of hydrogen stratification in enclosures: Model validation and application to PAR performance // *Nuclear Engineering and Design*. 2016. Vol. 310. Pp. 142–153. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.08.036
16. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. : Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
17. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС, 2005. 336 с.

REFERENCES

1. Kirillov I.A., Kharitonova N.L., Sharafutdinov R.B., Khrennikov N.N. Hydrogen safety for nuclear power plants with light water reactor units. Current state of the problem. *Nuclear and Radiation Safety*. 2017; 2(48):1-12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29680571> (rus.).
2. International Atomic Energy Agency (IAEA), Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors. *IAEA-TECDOC-1196*. Vienna, 2001.
3. Shapiro Z.M., Moffette T.R. Hydrogen Flammability Data and Application to PWR loss-of-coolant accident, WAPD-SC-545. *Westinghouse Electric Corp.* Bettis Plant, Pittsburgh, 1957; The Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants, WASH-740. *Atomic Energy Commission*. 1957.
4. Payot F., Reinecke E., Morfin F., Sabroux J.C., Meynet N., Bentaib A., et al. Understanding of the operation behaviour of Passive Autocatalytic Recombiner (PRA) for hydrogen mitigation in realistic containment conditions during a severe Light Water Nuclear Reactor (LWR) accidents. *Nuclear Engineering and Design*. 2012; 248:178-196. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.03.042
5. Shukla V., Ganju S., Varma S., Sengupta S., Maheshwari N.K. Affect of Recombiner Location on its Performance in Closed Containment under Dry and Steam Conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44(47):25957-25973. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.015
6. Shebeko Yu.N., Keller V.D., Eremenko O.Ya., Smolin I.M. Peculiarities of formation and combustion of local hydrogen-air mixtures in a large volume. *Chemical Industry*. 1988; 12:24-27. (rus.).
7. Shevyakov G.G., Savelyeva N.I. Hydrogen jet propagation and burning in ambient air. *Alternativnaya Energetika i Ekologiya/Alternative Energy and Ecology*. 2004; 1(9):23-27. (rus.).
8. Rubtsov N.M., Seplyarskii B.S. Concentration limits of combustion in rich hydrogen–air mixtures in the presence of inhibitors. *Mendeleev Communications*. 2010; 20(5):296-298. DOI: 10.1016/j.mencom.2010.09.020
9. Kirillov I.A., Simonenko V.A., Kharitonova N.L. Problems of normative, experimental and computation-

- al-theoretical safety of hydrogen energy. *Russian Nanotechnologies*. 2020; 15(3):402-414. DOI: 10.1134/S1992722320030061 (rus.).
10. Panteleev V.A., Kirillov I.A. Method for describing scenarios of cascade and intersystem accidents with taking into account probabilistic factors. *Problems of safety and emergency situations*. 2019; 5:53. (rus.).
 11. Gharari R., Kazeminejad H., Mataji Kojouri N., He-dayat A. A review on hydrogen generation, explosion and mitigation during severe accidents in light water nuclear reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018; 43(4):1939-1965. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.174
 12. Rozen A. Simulation of start-up behaviour of a passive autocatalytic hydrogen recombiner. *Nukleonika*. 2018; 63(2):27-41. DOI: 10.2478/nuka-2018-0004
 13. Dehjourian M., Sayareh R., Rahgoshay M., Jahanfarnia G., Shirani A. Investigation of a hydrogen mitigation system during large break loss-of-coolant accident for a two-loop pressurized water reactor. *Nuclear Engineering and Technology*. 2016; 48(5):1174-1183. DOI: 10.1016/j.net.2016.04.002
 14. Puzach S.V., Lebedchenko O.S. Location of explosive and fire-hazardous areas of the hydrogen-air mixture along the height of the convective column formed above the source of hydrogen leakage in the room. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(1):18-24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.18-24 (rus.).
 15. Hoyes J.R., Ivings M.J. CFD modeling of hydrogen stratification in enclosures: Model validation and application to PAR performance. *Nuclear Engineering and Design*. 2016; 310:142-153. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.08.036
 16. Patankar S. *Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow, Energoatomizdat, 1984; 152. (rus.).
 17. Puzach S.V. *Methods of calculating heat and mass transfer in a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety*. Moscow, Academy of GPS, 2005; 336. (rus.).

Поступила 09.03.2023, после доработки 20.03.2023;

принята к публикации 22.03.2023

Received March 9, 2023; Received in revised form March 20, 2023;

Accepted March 22, 2023

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

ЛЕБЕДЧЕНКО Ольга Сергеевна, канд. юр. наук, доцент, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 770128; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Olga S. LEBEDCHENKO, Cand. Sci. (Legal), Docent, Assistant Professor of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 770128, ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.