

УДК 001.891.54:544.45:614.83

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УТЕЧКИ ВОДОРОДА В ВЕНТИЛИРУЕМОМ ПОМЕЩЕНИИ

Кутузова К.С., Стаханов В.В., Безгодов Е.В., Томилов Ю.А., Попов И.А., Пасюков С.Д., Тараканов А.А.
(ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск)

e-mail: kutuzovaks@vniitf.ru

Водород производится разными способами, но наиболее экологически чистым без выделения углекислого газа является получение в электролизерах, которые могут быть размещены в ограниченных или замкнутых помещениях. При аварийной разгерметизации электролизера система вентиляции помещения должна обеспечивать его эффективное удаление во избежание образования взрывоопасной водородно-воздушной смеси. Методика оценки последствий взрывобезопасности объектов должна учитывать разные параметры аварийной ситуации, например, массовый расход топлива при утечке, конфигурацию помещений, характеристики вентиляционных систем. Для ее уточнения требуются экспериментальные исследования по заполнению водородом помещения с массовым расходом, соответствующим утечке в предполагаемой аварийной ситуации.

В настоящее время есть два подхода численного моделирования вентиляции газов: CFD и инженерные модели. Использование последних позволяет быстро оценить параметры вентиляции однотипных помещений по взаимосвязи между заданными переменными (скорость утечки водорода, объем помещения, размер вентиляционных отверстий и др.), однако с определенной точностью и в определенном диапазоне изменения величин [1, 2].

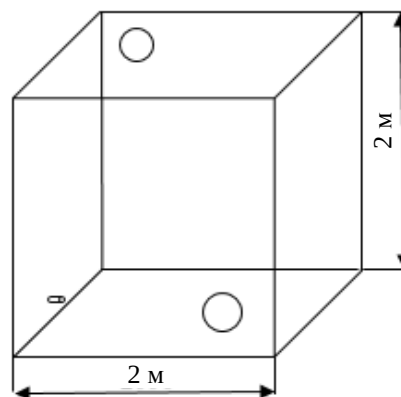
Преимущества CFD-моделирования заключаются в возможности проведения множества расчетов с произвольной геометрией помещения, варьируемыми параметрами вентиляции, скорости подачи газа и получения информации о динамике распространения водорода. Сравнение результатов CFD-моделирования истечения водорода в помещении с двумя вентиляционными отверстиями с экспериментом показало согласие [3, 4]. Это свидетельствует о возможности применения CFD-моделирования для данного класса задач. CFD-моделирование может быть использовано для создания и уточнения инженерных моделей. Кроме того, оно может заменить дорогостоящие натурные эксперименты с

использованием воспламеняемых сред. Недостатком такого моделирования является высокая вычислительная стоимость, особенно при решении задач с высокоскоростными течениями.

Целями настоящей работы являлись разработка расчетной методики и ее оценка на экспериментальных данных.

Экспериментальная установка и система измерений. Эксперименты проводили в кубе со стороной 2 м, с двумя круглыми вентиляционными отверстиями диаметром 0,1 или 0,2 м, расположенными на противоположных сторонах (рис. 1). Внутри куба горизонтально на правой боковой грани на высоте 0,25 м размещен трубопровод внутренним диаметром 15 мм, по которому подавался горючий газ. Массовый расход подаваемого водорода 0,125 и 0,445 г/с, что соответствовало производительности двух электролизеров, число Фруда 451 и 5850 [5, 6]. При таких режимах истечения импульс струи сохранялся на расстоянии 0,33 и 1,17 м, т.е. струя не достигала противоположной стенки стенда.

В разных точках объема помещения размещали датчики для контроля концентрации водорода. Вентилятор диаметром 0,12 м, максимальным объемным расходом 205 м³/ч, операционной частотой 2650 об./мин, максимальным напором 85 Па располагали в верхнем отверстии по центру, направление обдува — наружу из помещения.



Р и с. 1. Схема помещения

Предварительно было проведено численное моделирование. Приведем основные модели методики.

Физическая модель. Для решения применялась система газодинамических уравнений, состоящая из уравнений сохранения массы, импульса, энергии и состояния идеального газа. Система уравнений решалась в приближении малой сжимаемости в неявном виде с применением итерационного метода [7]. Газовая среда представлена многокомпонентной смесью. Для каждого компонента смеси решалось уравнение переноса. Расчет нестационарный, трехмерный. Шаг интегрирования системы варьировался в интервале 0,001—0,1. Число итераций на шаг интегрирования задавалось равным 20. Для моделирования турбулентности использовалась k — ϵ -модель [8].

В уравнениях концентрации компонентов были учтены диффузионные члены. Динамическая вязкость и теплопроводность многокомпонентной газовой смеси рассчитывались по молекулярно-кинетическим соотношениям с использованием метода усреднения [9]. Модель также учитывала влияние силы тяжести.

Геометрическая и сеточная модели. Для повышения точности расчета потоков газа, входящих и выходящих из помещения, к расчетной области помещения обычно добавляется некоторый объем окружающей среды или на вентиляционных отверстиях [3, 10]. По результатам исследования способа задания внешнего объема, моделирующего окружающую среду, была выбрана полусфера снаружи помещения [11]. Для корректного моделирования уноса смеси в окружающую среду радиус полусферы должен превышать характерный размер помещения более чем в 2 раза.

Геометрия расчетной области, показанная на рис. 2, включала в себя помещение с двумя вентиляционными отверстиями размером 0,1 или 0,2 м, трубопровод, внешнюю область, вентилятор в центре верхнего отверстия. На основе геометрии расчетной модели была построена сеточная модель. Средний линейный размер ячейки 0,1 м. Тип применяемой ячейки многогранный. В области трубопровода, вентилятора и вентиляционных отверстий проводилось измельчение сетки до минимального размера ячейки 0,5 мм.



Р и с. 2. Геометрия расчетной области

Граничные условия. На внешней границе расчетной области было задано условие свободного протекания. Границы помещения задавались как жесткие стенки. На входе трубопровода для подачи водорода задавался постоянный массовый расход водорода. На месте лопасти вентилятора задавалась граница, на которой указывались его напорно-расходные характеристики.

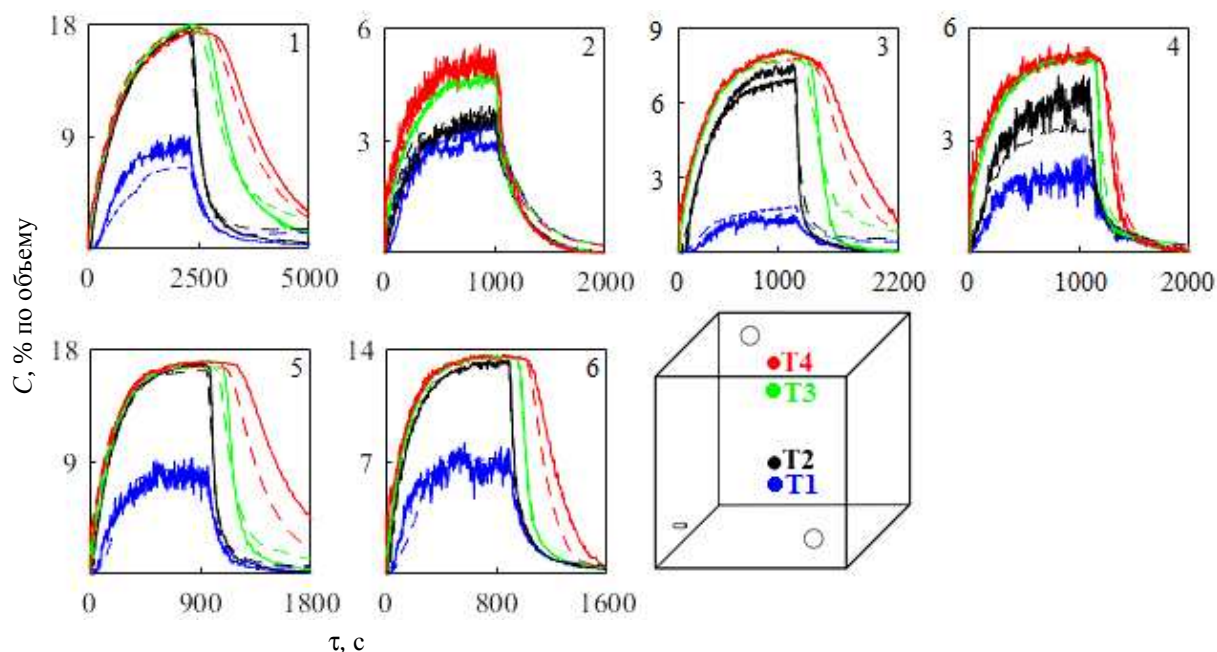
Расчеты и эксперименты (см. таблицу). В расчетах и экспериментах исследовали эффективность вентиляции при разгерметизации в помещении электролизера производительностью 0,125 и 0,445 г/с. Изменение содержания водорода в помещении отслеживали в условиях естественной и принудительной вентиляции.

Параметры расчетов и экспериментов

Номер эксперимента	Массовый расход, г/с	Вентиляция	Диаметр отверстий, м
1	0,125	Естественная	0,1
2	0,125	Принудительная	0,1
3	0,125	Естественная	0,2
4	0,125	Принудительная	0,2
5	0,445	Естественная	0,2
6	0,445	Принудительная	0,2

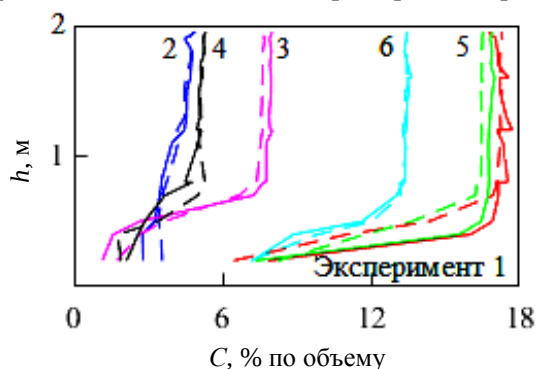
В начальный момент времени открывали верхнее и нижнее отверстие диаметром 0,1 или 0,2 м, включали вентилятор, если это было необходимо в соответствии с экспериментом, начинали подачу водорода с постоянным массовым расходом. Спустя некоторое время после начала эксперимента при установившемся неизменном содержании водорода в помещении его подачу прекращали.

Как видно на рис. 3, расчетное изменение во времени содержания водорода в точках контроля состава согласуется с экспериментальным.



Р и с. 3. Расчетное (---) и измеренное содержание водорода (—) в некоторых точках контроля состава

На рис. 4 видно, что предварительные расчеты согласуются с экспериментальными данными в разных постановках, в частности, удовлетворительно согласуется максимальное содержание водорода. Как в расчетах, так и в экспериментах в верхней части помещения наблюдается характерный слой с максимальным однородным содержанием водорода. Некоторые отклонения наблюдаются в нижней части помещения для экспериментов с естественной вентиляцией (№ 1 и 5). Это может быть связано с тем, что параметры потока воздуха, поступающего в нижнее вентиляционное отверстие, зависели от условий окружающей среды, в частности, от температуры, влажности и атмосферного давления. Условия окружающей среды в предварительных расчетах и соответствующих экспериментах отличались, например, температура

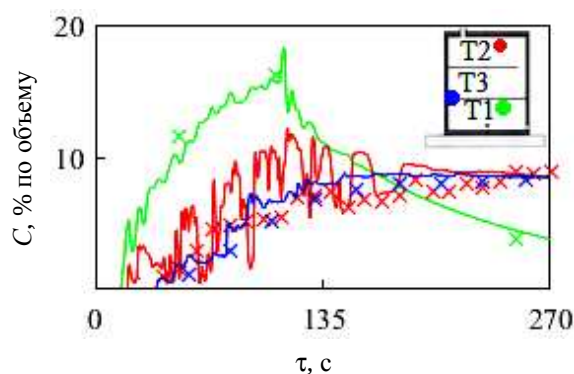


Р и с. 4. Расчетное (---) и измеренное содержание водорода (—) по высоте помещения в момент прекращения подачи газа в экспериментах 1—6

воздуха в экспериментах была ниже в среднем на 10°C , наличие водяного пара в воздухе в расчетах не учитывалось. Расчеты с условиями окружающей среды, как в эксперименте, на данном этапе работы не проводили.

Дополнительно проводилась оценка применения расчетной методики на ранее проведенных экспериментах [12]. На рис. 5 сравнивается содержание водорода в расчете и эксперименте ЛР1 [12]. Расчетные и экспериментальные данные согласуются, что свидетельствует об удовлетворительных результатах применения расчетной методики для описания истечения водорода в вентилируемое помещение с наличием загромождений, моделирующих макеты оборудования (мостки, колонны, трубопроводы и др.).

Заключение. Разработанная расчетная методика моделирования аварийных сценариев с



Р и с. 5. Расчетное (—) и измеренное содержание водорода (×) в некоторых точках контроля состава

истечением водорода в вентилируемые помещения показала качественное совпадение с экспериментом, в частности, удовлетворительное прогнозирование максимального водорода в помещении, а также высоту однородной зоны с повышенным содержанием водорода. Дополнительная оценка расчетов на основе экспериментов истечения горючих газов в помещение с загромождениями также согласуется с экспериментом. Расчетная методика может быть использована для проектирования вентиляционных систем объектов, в частности, помещений с электролизерами для производства водорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Duclos A., Proust C., Daubech J., Verbecke F.** Development of a realistic hydrogen flammable atmosphere inside a 4 m³ enclosure. — In: ICHS-2017. Hambourg, 2017, p. 727—738.
2. **Lowesmith D., Hankinson G., Spataru C., Stobbart M.** Gas build-up in a domestic property following releases of methane/hydrogen mixtures. — Intern. Hydrogen Energy, 2009, v. 34(14), p. 5932—5939.
3. **Ghatauray T., Ingram J., Holborn G.** A comparison study into low leak rate buoyant gas dispersion in a small fuel cell enclosure using plain and louver vent passive ventilation schemes — Ibid., 2019, v. 44, p. 8904—8913.
4. **Saikal E., Ledac P., Bruneton A. e.a.** Numerical modeling of a moderate hydrogen leakage in a typical two-vented fuel cell configuration. — In: ICHS, on-line Conf., 2021.
5. **URL:** <https://centrotech.ru/vodorodnaya-energetika/electrolizneustanovki/> (дата обращения 28.02.2023).
6. **Schefer R., Houf W., Williams T.** Investigation of small-scale unintended releases of hydrogen: momentum dominated regime. — Intern. Hydrogen Energy, 2008, v. 33, p. 6373—6380.
7. **The Open Source CFD Toolbox.** User Guide, 2016, v. 1612.
8. **Jones W., Launder B.** The prediction laminarization with a two equation model of turbulence. — Heat Mass Transfer, 1972, № 15, p. 301—314.
9. **Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р.** Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: Физматлит, 2003.
10. **Bernard-Michel G., Houssin-Agbomson D.** Comparison of helium and hydrogen releases in 1 m³ and 2 m³ two vents enclosures. Concentration measurements at different flow rates and for two diameters of injection nozzle. — Intern. Hydrogen Energy, 2017, v. 42, p. 7542—7550.
11. **Кутузова К.С., Щенникова Е.М., Томилов Ю.А. и др.** Численное моделирование утечки водорода в ограниченное помещение с вентиляционными отверстиями. — В сб.: Научная сессия НИЯУ МИФИ. Снежинск, СФТИ НИЯУ МИФИ, 2022, с 90—93.
12. **Безгодов Е.В., Давлетчин Ю.Ф., Крюков В.М. и др.** Исследование распределения и горения смесей водорода и метана с воздухом в контейнере с перегородками. — Атомная энергия, 2021, т. 131, вып. 5, с. 254—260.

Поступила в Редакцию 30.06.23

УДК 001.891.54:544.45:614.83

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ И ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА В ВЕНТИЛИРУЕМОМ ПОМЕЩЕНИИ

Кутузова К.С., Стаханов В.В., Безгодов Е.В., Мастюк Д.А., Попов И.А., Пасюков С.Д., Тараканов А.А.
(ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск)

e-mail: kutuzovaks@vniitf.ru

Настоящая статья является продолжением работы [1]. Экспериментальных данных недостаточно для верификации программных кодов. Интерес представляют изменение высоты водородного слоя во времени, что позволяет оценить динамику массы воспламеняемой водородно-воздушной смеси, время, требуемое для установления невоспламеняемой смеси в помещении при прекращении истечения горючего газа, содержание водорода в помещении в условиях естественной и принудительной вентиляции.

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном исследовании взрывобезопас-

ности состава, образованного в результате аварии с разгерметизацией баллона с водородом или электролизера в вентилируемом помещении со сбросными клапанами. Полученные данные необходимы для верификации программных комплексов, используемых при моделировании утечки водорода на объектах водородной энергетики в рамках обоснования их безопасности.

Эксперименты проводили в помещении, представляющем собой куб со стороной 2 м. В нем имеются два расположенных на противоположных сторонах круглых вентиляционных отверстия диаметром 0,1 или 0,2 м. Центр от-