

ЗАПОЛНЕНИЕ ПРОБЕЛОВ В ЗНАНИЯХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УЗКИХ МЕСТ В ОБЛАСТИ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ: РЕЗУЛЬТАТЫ НЕДАВНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОЛЬСТЕРЕ*

В. Мольков

HySAFER центр, Университет Ольстера

Аннотация: Описаны последние достижения в исследованиях водородной безопасности в центре HySAFER по разработке прорывной технологии создания взрывобезопасного композитного бака и методологии расчета длины пламени от разрыва водородного трубопровода, заглубленного в почву. Количественная оценка рисков хранения водорода на транспортных средствах показала, что для водородных автомобилей на дорогах Лондона риски приемлемы, если огнестойкость бортовых баков, т. е. время от начала пожара до разрыва бака в пожаре в условиях отказавшего или заблокированного в аварии термически активируемого устройства для сброса давления, превышает 50 мин. Огнестойкость существующих баков составляет всего 4–12 мин. Описано изобретение «Композитный бак для хранения водорода», которое позволяет увеличить огнестойкость до «бесконечности». Представлены концепция и результаты испытаний взрывобезопасного резервуара. Различие с существующим баком заключается в использовании двух (не одного!) композитов в стенке бака. Параметры лайнера и двух композитов, включая их толщины, выбраны так, чтобы расплавить лайнер и начать истечение водорода через материал стенки, до того как фронт разложения смолы в композите продвинется на глубину, при которой достигается предел прочности участка стены. Микроутечки через материал стены снижают давление внутри бака, а концентрация водорода падает ниже нижнего предела распространения пламени уже в нескольких миллиметрах от поверхности. Водородное микропламя невидимо и не изменяет размер внешнего пламени. Такой бак обеспечивает беспрецедентную взрывобезопасность при пожаре и предотвращает катастрофические последствия при разрыве стенок: взрывную волну, огненный шар, осколки и т. д. Разрыв водородной трубы является возможным сценарием аварии. Выброс водорода при таком сценарии будет происходить из двух образовавшихся участков труб в виде горизонтально ориентированных сталкивающихся струй. Представлены детали модели истечения водорода и безразмерная корреляция для длины пламени, преимущество которой состоит в использовании не только числа Фруда, но и чисел Рейнольдса и Маха. Описан эксперимент с давлением в трубопроводной системе 60 бар и объемом 163 м³ (трубы диаметром 30,48 и 20,32 см, ведущие к испытательному отрезку диаметром 15,2 см). Уравнение Абеля–Нобеля дает массу водорода в системе 792 кг. Истечение из трубопровода сильно отличается от истечения через отверстие того же диаметра из сосуда. Поток в трубопроводе сопутствуют значительные потери. Ключевой вопрос заключается в том, какое значение коэффициента расхода, C_D , является репрезентативным для учета этих потерь. Экспериментальное время истечения 792 кг водорода из трубопровода объемом 163 м³ при давлении 60 бар составило 80 с. Для воспроизведения этого времени истечения в расчете должно использоваться значение $C_D = 0,26$ вместо идеального значения $C_D = 1$. Максимальная длина пламени в эксперименте наблюдалась на 6-й секунде после разрыва трубы в момент, когда оно вырвалось из почвы (когда давление упало от 60 до 41 бар). Корреляция дает длину пламени 104 м при давлении 41 бар. Это значение лежит между максимальной мгновенной длиной пламени 111,5 м и измеренной длиной пламени 93 м в этот момент времени. Измеренная длина пламени через 40 с после разрыва составила 40 м. Модель истечения для этого момента времени дает давление 6,94 бар, а корреляция для длины пламени дает близкое значение — 46 м.

Ключевые слова: водородная безопасность; предупреждение взрыва; трубопровод; длина пламени

DOI: 10.30826/CE20130201

Литература

1. Dadashzadeh M., Kashkarov S., Makarov D., Molkov V. Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage // Int. J. Hydrogen Energ., 2018. Vol. 43. P. 6462–6475.
2. University of Ulster. Composite vessel for hydrogen storage. European (EPO) Patent Application

*Автор признателен коллегам из Центра HySAFER Ольстерского университета и EPSRC за финансирование через H2FC SUPERGEN Hub в рамках гранта EP/P024807/1. Это исследование получило финансирование от FCH 2 JU в соответствии с соглашением о предоставлении грантов № 826193 (HyTunnel-CS); FCH 2 JU получает поддержку от исследовательской и инновационной программы Европейского союза «Горизонт 2020», «Водородная Европа» и «Исследовательская водородная Европа».

- No. 18706224.5. International (PCT) Application No. PCT/EP2018/053384, 14.02.2017.
3. *Butler M. S., Moran C. W., Sunderland P. B., Axelbaum R. L.* Limits for hydrogen leaks that can support stable flames // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2009. Vol. 34. P. 5174–5182.
 4. *Lecoustre V. R., Sunderland P. B., Chao B. H., Axelbaum R. L.* Extremely weak hydrogen flames // *Combust. Flame*, 2010. Vol. 157. P. 2209–2210.
 5. *Molkov V.* 2012. Fundamentals of hydrogen safety engineering. bookboon.com. 216 p.
 6. *Molkov V., Saffers J.-B.* Hydrogen jet flames // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2013. Vol. 38. P. 8141–8158.
 7. *Acton M. R., Allason D., Creitz L. W., Lowesmith B. J.* Large scale experiments to study hydrogen pipeline fires // 8th Pipeline Conference (International) Proceedings, 2010. Calgary, Alberta, Canada. P. 593–602.

Поступила в редакцию 21.01.2020