ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ, 2026. Том 19. №2. С. 3–13

ОПАСНОСТЬ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ ВОДОРОДА В ПОМЕЩЕНИЯХ И В ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Ю. Н. Шебеко[1]

Аннотация: Проведен анализ отечественных и зарубежных публикаций, посвященных оценке взрывопожарной опасности аварийных выбросов газообразного и жидкого водорода как в открытом пространстве, так и в объеме помещений. Рассмотрены случаи как воспламенения газа, так и выбросы водорода без него. Для случая открытого пространства оценены размеры образующихся взрывоопасных зон, которые могут составлять величину десятков метров. При истечении водорода в замкнутое пространство с зажиганием газа возможны как образование факела, так и взрыв водородно-воздушной смеси в зависимости от времени задержки зажигания. В случае отсутствия воспламенения в припотолочной области происходит образование слоя газа с практически однородной концентрацией водорода, при этом время выравнивания концентраций H_2 при отсутствии внешнего воздействия может достигать нескольких часов. Отмеченные в статье опасные факторы аварийных выбросов H_2 следует учитывать как при разработке нормативных документов по пожарной опасности объектов водородной энергетики, так и при реализации конкретных проектов объектов указанной выше отрасли.

Ключевые слова: водород; аварийные выбросы; зажигание; взрывоопасные зоны; сценарии аварий

DOI: 10.30826/CE26190201 **EDN:** KUPBNS

Литература

1. *Шебеко Ю. Н.* Нормативные документы, регламентирующие вопросы пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // Пожарная безопасность, 2020. № 4. С. 36–42.
2. *Шебеко Ю. Н.* Пожарная безопасность хранения и транспортировки водорода // Пожарная безопасность, 2023. № 1. С. 17–26.
3. *Шебеко Ю. Н.* Пожарная безопасность заправочной инфраструктуры транспорта на водородном топливе // Пожаровзрывобезопасность, 2024. Т. 34. № 6. С. 56–66.
4. *Royle M., Willoughby D. B.* Consequences of catastrophic releases of ignited hydrogen jet releases // Int. J. Hydrogen Energ., 2011. Vol. 36. P. 2688–2692.
5. *Blanchetiere V., Armstrong A., Wang Y., Jambut R., Wilkins B., Salaun N.* Delayed ignition of high-pressure hydrogen releases — experiments and engineering models // 15th Symposium (International) on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions Proceedings. — Naples, Italy: Zenodo, 2024. P. 1307–1321.
6. *Daubech J., Herbrandt J., Jallais S., Vayzmina E., Jamois D., Verbecke F.* Un-ignited and ignited high pressure hydrogen releases: Concentration–turbulence mapping and overpressure effects // J. Loss Prevent. Proc., 2015. Vol. 36. P. 439–446.
7. *Sun B., Loughnan T.* Consequences analysis of vapour cloud explosion from the release of high-pressure hydrogen storage // Int. J. Hydrogen Energ., 2024. Vol. 50. P. 1137–1150.
8. *Chau K., Djire A., Khan F.* Review and analysis of the hydrogen production technologies from a safety perspectives // Int. J. Hydrogen Energ., 2022. Vol. 47. No. 29. P. 13990–14007.
9. *Gosvani R., Sun B.* Study of vapor dispersion and explosion from compressed hydrogen spill: Risk assessment on a hydrogen plant // Int. J. Hydrogen Energ., 2022. Vol. 47. P. 41195–41207.
10. *Keenan J. J., Makarov D. V., Molkov V. V.* Modeling and simulation of high-pressure hydrogen jets using notional nozzle theory and open source code Open FOAM // Int. J. Hydrogen Energ., 2024. Vol. 80. P. 1137–1150.
11. *Roberts P., Shivill L., Roberts T., Butler C., Royle M.* Dispersion of hydrogen from high-pressure sources // Inst. Chem. E., 2006. No. 151. P. 410–425.
12. *Макеев В. И.* Безопасность объектов с использованием жидких криогенных продуктов // Пожаровзрывобезопасность, 1992. Т. 1. № 3. С. 34–45.
13. *Hall J. E., Hooker P., Willoughby D.* Ignited releases of liquid hydrogen: Safety considerations of thermal and overpressure effects // Int. J. Hydrogen Energ., 2014. Vol. 39. P. 20547–20553.
14. *Witcofski R. D., Chirivella J. E.* Experimental and analytical analysis of the mechanisms governing the dispersion of flammable clouds firmed by liquid hydrogen spills // Int. J. Hydrogen Energ., 1984. Vol. 9. No. 5. P. 425–435.
15. *Verfondern K., Dienhart B.* Experimental and theoretical investigation of liquid hydrogen pool spreading and vaporization // Int. J. Hydrogen Energ., 1997. Vol. 22. No. 7. P. 649–660.

[1]Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ВНИИПО МЧС Росии), yn_shebeko@mail.ru

16. *Panda P. P., Hecht E. S.* Ignition and flame characteristics of cryogenic hydrogen releases // Int. J. Hydrogen Energ., 2017. Vol. 42. No. 1. P. 775–785.
17. *Chauhan A., Liu H., Mohammadpour J., Abbassi R., Salehi F.* Towards safer hydrogen refueling stations: Insights from computational fluid dynamics of LH_2 leakages // J. Loss Prevent. Proc., 2024. Vol. 90. P. 105355.
18. *Aditiya H. B., Aziz M.* Prospect of hydrogen energy in Asia-Pacific: A perspective review on techno-socio-economy nexus // Int. J. Hydrogen Energ., 2021. Vol. 46. P. 35027–35056.
19. *Singth S., Jain S., Tiwari A. K., Nouni M. R., Pandley J. K., Goel S.* Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector // Renew. Sust. Energ. Rev., 2015. Vol. 51. P. 623–633.
20. *Hansen O. R.* Liquid hydrogen releases show dense gas behavior // Int. J. Hydrogen Energ., 2020. Vol. 45. P. 1343–1358.
21. *Sun R., Pu I., Yu H., Dai M., Li Y.* Modeling of the diffusion of flammable hydrogen cloud under different liquid hydrogen leakage conditions in a hydrogen refueling station // Int. J. Hydrogen Energ., 2022. Vol. 47. P. 25849–25863.
22. *Lacome J. M., Jamois D., Perrette L., Proust C. H.* Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area // Int. J. Hydrogen Energ., 2011. Vol. 36. P. 2302–2312.
23. *Шебеко Ю. Н., Келлер В. Д., Еременко О. Я., Смолин И. М., Серкин М. А., Корольченко А. Я., Ильин А. Б.* Закономерности образования и горения локальных водородовоздушных смесей в большом объеме // Химическая промышленность, 1988. № 12. С. 728–731.
24. *Liu H., Salehi F., Abbassi R., Lau T., Yeoh G. H., Mitchell-Corbett F., Raman V.* Experimental and numerical analysis of low-density gas dispersion characteristics in semi-confined environment // J. Loss Prevent. Proc., 2023. Vol. 86. P. 105184.
25. *Takeno K., Okabayashi K., Kouchi A., Nonaka T., Hashiguchi K., Chitose K.* Dispersion and explosion field tests for 40 MPa pressurized hydrogen // Int. J. Hydrogen Energ., 2007. Vol. 32. P. 2144–2153.
26. *Ganci F., Carpignano A., Mattei N., Carcassi M. N.* Hydrogen release and atmospheric dispersion: Experimental studies and comparison with parametric simulations // Int. J. Hydrogen Energ., 2011. Vol. 36. P. 2445–2454.
27. *Henriksen M., Fossum H., Akervik E., Bjerketvedt D.* Experiments and simulations of hydrogen dispersion in a 6-meter-long channel // 15th Symposium (International) on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions Proceedings. — Naples, Italy: Zenodo, 2024. P. 272–283.
28. *Hildershavn A., Skjold T., Hisken H.* Review and evaluation of engineering models for simulating small hydrogen releases in large enclosures // 15th Symposium (International) on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions Proceedings. — Naples, Italy: Zenodo, 2024. P. 898–907.
29. *Gupta S., Brinser J., Studer E., Tkachenko I.* Hydrogen related risks within a private garage: Concentrations measurements in a realistic full scaleexperimental facility // Int. J. Hydrogen Energ., 2009. Vol. 34. P. 5902–5911.
30. *Pitts W. M., Jang J. C., Blais M., Joyce A.* Dispersing and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles // Int. J. Hydrogen Energ., 2012. Vol. 37. P. 17457–17469.
31. *Lach A. W., Gaathaug A. V., Vaagsaether K.* Pressure peaking phenomena: Unignited hydrogen releases in confined spaces — large-scale experiments // Int. J. Hydrogen Energ., 2020. Vol. 45. P. 32702–32712.
32. *Brennan S., Molkov V.* Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation // Int. J. Hydrogen Energ., 2013. Vol. 38. P. 8159–8166.
33. *Shentsov V., Kuznetsov M., Molkov V. V.* The pressure peaking phenomena: Validation for unignited releases in laboratory scale enclosure // Int. J. Hydrogen Energ., 2015. Vol. 48. P. 10.
34. *Brennan S., Hussein H. G., Makarov D., Shentsov V., Molkov V.* Pressure effects of an unignited release from onboard storage in a garage with a single vent // Int. J. Hydrogen Energ., 2019. Vol. 44. P. 8927–8934.
35. *Hooker P., Hall J., Hoyes J. R., Newton A. , Willoughby D.* Hydrogen jet fires in passively ventilated enclosure // Int. J. Hydrogen Energ., 2017. Vol. 42. P. 7577–7588.
36. *Fuster B., Houssin-Agbomson D., Jallais S., et al.* Guidelines and recommendations for indoor use of full cells and hydrogen systems // Int. J. Hydrogen Energ., 2017. Vol. 42. P. 7600–7607.

Поступила в редакцию 27.10.2025
После доработки 17.02.2026
Принята к публикации 20.02.2026