

НАХОЖДЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ГОРЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА С МИКРОКАПЛЯМИ ВОДЫ

К.С. Лобов

koc.99@mail.ru

SPIN-код: 1415-3165

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

С помощью методов численного моделирования проведено исследование распространения пламени в обедненной водородовоздушной смеси с каплями воды, что особенно актуально для приложений пожаробезопасности, в частности, для хранения и транспортировки водорода и ядерной энергетики. Рассмотрены два случая: распространение пламени в канале, заполненном предварительно перемешанной водородовоздушной смесью с изначально неподвижными каплями воды, и горение газокапельной взвеси при ее направленной подаче в зону реакции в проточном реакторе. Определены пределы горения для каждого случая. Обнаружено, что капли воды малого диаметра позволяют эффективнее тушить пламя, а также что капли большого диаметра при определенных концентрациях способствуют быстрому охлаждению продуктов реакции. Установлено, что при направленной подаче газокапельной смеси в зону реакции тушение огня наблюдается при меньшей массовой концентрации капель, чем в случае распространения пламени в канале с неподвижными взвешенными каплями.

Ключевые слова

Горение обедненной водородовоздушной смеси, капли воды, горение в канале, горение в проточном реакторе, пределы горения, пожаробезопасность, континуальная двухскоростная двухтемпературная модель, численное моделирование

Поступила в редакцию 05.07.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Сжигание газовых смесей на водородной основе представляет собой серьезную проблему для многих развивающихся и существующих технологических систем. Прежде всего, водород — перспективное возобновляемое топливо с высокой удельной энергоемкостью, уменьшенными вредными выбросами и высокой экономичностью [1]. При этом неконтролируемые выбросы водорода в атмосферу с последующим воспламенением сформировавшейся горючей смеси в ходе работы современных технических систем или в результате чрезвычайных ситуаций на АЭС являются серьезной угрозой техногенных аварий. Поэтому горение водорода в присутствии капель жидкости представляет интерес для приложений пожаро- и взрывобезопасности, в частности, для хранения и транспортировки водорода [2] и ядерной энергетики [3].

Один из возможных способов полного или частичного тушения пламени — добавление диспергированных капель воды в образовавшуюся горючую смесь. Благодаря низкой стоимости, высокой удельной теплоемкости и скрытой теп-

лоте испарения вода является одним из широко используемых ингибиторов горения [4]. При взаимодействии капель воды с пламенем процесс испарения приводит к потерям тепла в зоне реакции и разбавлению горючей смеси инертным водяным паром, это позволяет подавить или полностью погасить пламя. В целом эксперимент показывает, что благодаря добавлению капель воды в газовую горючую смесь при оптимальной настройке параметров водной фазы возможны тушение дозвукового или даже детонационного горения [5, 6], ослабление взрывной волны [7], снижение темпов ускорения пламени и предотвращение перехода горения в детонацию [8]. Сообщается также об увеличении нижнего предела воспламенения при наличии капель воды в горючей водородно-воздушной смеси [9, 10].

В данной работе проведено детальное численное моделирование распространения пламени в канале, заполненном предварительно перемешанной водородо-воздушной смесью с изначально неподвижными каплями воды, и моделирование горения газок капельной взвеси в случае ее направленной подачи в зону реакции в проточном реакторе. В результате были определены пределы горения газовых смесей на основе водорода с содержанием взвешенных капель воды.

Описание математической модели. Для описания динамики реагирующих потоков газов с каплями воды в данной работе использована континуальная двухскоростная двухтемпературная одномерная модель в приближении малой сжимаемости, включающая законы сохранения полной массы, масс отдельных компонентов смеси, импульса и энергии, уравнения состояния среды. В ней также учитывались теплопроводность, вязкость, многокомпонентная диффузия, химические превращения, обмен массой, импульсом и энергией с жидкой фазой.

Полная система уравнений приведена ниже [11]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} &= \dot{m}; \\ \frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_k u_x}{\partial x} &= \frac{\partial \rho Y_k V_{k,x}}{\partial x} + \dot{\omega}_k + \dot{m}_k; \\ \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} - \tilde{p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \right) &= \frac{1}{\rho} \left[\rho_d f_{St} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \right]; \\ \frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho h_s u_x}{\partial x} &= \frac{d\bar{p}}{dt} + \sum_{k=1}^N \dot{\omega}_k h_{f,k}^0 + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \sum_{k=1}^N h_{s,k} Y_k V_{k,x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mathcal{K}(Y_k, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \sigma_{xx} \frac{\partial u_x}{\partial x} - \rho_d \left[u_d f_{St} + C_{d,p} \frac{T - T_d}{\tau_Q} \right], \end{aligned}$$

где ρ — плотность газовой смеси; t — время; u_x — компонента вектора массовой скорости потока; x — пространственная координата; \dot{m} — изменение массы, связанное с движением и испарением капель; $Y_k = \rho_k / M_k$ — молярная кон-

центрация k -го компонента газовой смеси; ρ_k — плотность k -го компонента газовой смеси; M_k — молярная масса k -го компонента газовой смеси; $V_{k,x}$ — составляющая вектора диффузионной скорости k -го компонента; $\dot{\omega}_k$ — изменение массовой доли k -го компонента в результате химических реакций; \dot{m}_k — изменение массовой доли k -го компонента связанное с движением и испарением капель; $H = u^2/2 + \tilde{p}/\rho$ — интеграл Бернулли; \tilde{p} — динамическая составляющая флуктуаций давления, которая намного меньше, чем термодинамическое давление \bar{p} и $p(x,t) = \bar{p}(t) + \tilde{p}(x,t)$; $f_{St} = u_x - u_d/\tau_{St}$ — сила сопротивления капель; u_d — скорость капель; $\tau_{St} = m_d/(3\pi\mu d_d)$ — характерный временной масштаб обмена импульсом между газовой фазой и фазой капель, рассчитываемый в соответствии с законом Стокса; m_d — масса капли воды; d_d — диаметр капли воды; σ_{xx} — компонента тензора вязких приближений; h_s — удельная энтальпия смеси; $h_{f,k}^0$ — удельная энтальпия образования k -го компонента газовой смеси; N — число компонентов смеси; $h_{s,k}$ — удельная энтальпия k -го компонента газовой смеси; $\mathcal{K}(Y_k, T)$ — коэффициент теплопроводности; T — температура газа; ρ_d — массовая плотность жидкой фазы; $C_{d,p}$ — удельная теплоемкость воды при постоянном давлении; T_d — температура жидкой фазы; $\tau_Q = d_d^2 C_{d,p} \rho_d^0 / 6\mathcal{K}\text{Nu}$ — характерное время теплообмена между фазами; ρ_d^0 — плотность воды; $\text{Nu} \approx 2$ — число Нуссельта.

Уравнения состояния многокомпонентной газовой смеси:

$$\bar{p} = \rho RT \sum_k \frac{Y_k}{M_k};$$

$$dh_s = C_p(Y_k, T) dT,$$

где R — универсальная газовая постоянная; $C_p(Y_k, T)$ — удельная теплоемкость смеси при постоянном давлении.

Вычисление компоненты тензора вязких напряжений осуществляется по выражению

$$\sigma_{xx} = \frac{4}{3} \mu(Y_k, T) \frac{\partial u_x}{\partial x},$$

где $\mu(Y_k, T)$ — коэффициент вязкости.

Уравнения для жидкой фазы имеют вид

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} + \frac{\partial \rho_d u_d}{\partial x} = -\dot{m};$$

$$\frac{\partial u_d}{\partial t} + u_d \frac{\partial u_d}{\partial x} = f_{St};$$

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} + u_d \frac{\partial T_d}{\partial x} = \frac{T - T_d}{\tau_Q}.$$

Для решения задач, поставленных на основе описанной выше математической модели, использовался вычислительный метод FDS (Fire Dynamics Simulator) [11].

Постановка задачи. Рассмотрим задачу о распространении пламени в газокапельной смеси в одномерном канале в следующей постановке: канал длиной 25 мм заполнен водородовоздушной смесью с взвешенными каплями воды, содержание водорода в которой составляет 15 %. Давление в канале равно 101 325 Па, начальная температура смеси 300 К. Зажигание смеси осуществляется вблизи закрытого торца канала в области шириной 0,4 мм с повышенной до 2500 К температурой. Схема, поясняющая постановку задачи, представлена на рис. 1.

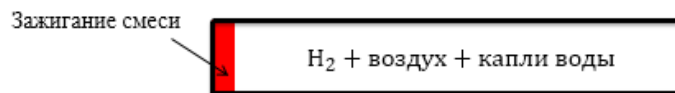


Рис. 1. Схема постановки задачи о распространении пламени в одномерном канале

Также рассмотрим процесс горения газокапельной смеси в одномерном горизонтальном проточном реакторе. Со стороны левого конца подается свежая водородовоздушная смесь с каплями воды заданного диаметра, со стороны правого конца выходят продукты реакции. Температура подающейся смеси, содержащей 15 % водорода, составляет 300 К. Давление в проточном реакторе равно 101 325 Па, длина канала 40 мм. Схема постановки задачи представлена на рис. 2.

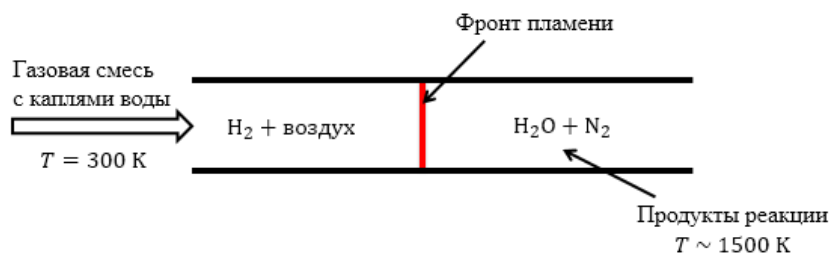


Рис. 2. Схема постановки задачи о горении газокапельной смеси в проточном реакторе

Газокапельная смесь подается в канал со скоростью U_{inflow} . Для исключения выхода зоны горения за пределы расчетной области и обеспечить большую дли-

тельность наблюдения процесса горения, расчетный модуль был модифицирован таким образом, чтобы обеспечить обратную связь между скоростью подачи газозвеси U_{inflow} и скоростью распространения пламени. В ходе расчета определяются координата фронта и динамика его перемещения, что позволяет автоматически подобрать скорость подачи смеси для стабилизации фронта пламени на масштабах расчетной области. При этом важным преимуществом такой постановки задачи является возможность нахождения также нормальной скорости горения газозвеси, по определению равной скорости подачи смеси, при которой пламя стабилизируется.

Варьируемыми параметрами в каждой из задач являются диаметр капель и массовая плотность жидкой фазы, которую обозначим как ρ_d . Размер расчетной ячейки dx составляет $1,0 \cdot 10^{-4}$ м. Предел горения определяем как предельную массовую плотность жидкой фазы, т. е. наибольшее значение ρ_d , при котором все еще происходит процесс горения заданной смеси.

Для нахождения пределов горения был проведен ряд расчетов по каждой задаче при различных значениях диаметра и ρ_d . Рассматривались следующие диаметры капель: 25, 50, 75, 100 мкм. На протяжении первых 0,2 с расчета в проточный реактор подавалась смесь с малым значением плотности жидкой фазы $\rho_d = 10^{-5}$ кг/м³, благодаря чему устанавливался стационарный режим горения практически чистой (без капель воды) газовой смеси. Таким образом, дальнейшее взаимодействие капель происходило с уже сформированным устойчивым фронтом горения. Далее начинала подаваться смесь с каплями воды.

Результаты и обсуждение. По расчетам задачи о распространении пламени в газокapельной смеси в одномерном канале были получены профили температуры и массовой плотности жидкой фазы в канале для различных моментов времени. Графики с данными профилями для различных значений ρ_d при диаметре капель 25 мкм показаны на рис. 3, при диаметре 100 мкм — на рис. 4.

Из рис. 3 видно, что при $\rho_d = 0,06$ кг/м³ температура фронта со временем остается достаточно большой для поддержания горения, т. е. при данных параметрах смесь горит, а при $\rho_d = 0,07$ кг/м³ температура резко падает и процесс горения прекращается, значит, при данном значении плотности жидкой фазы смесь гаснет. Аналогично проанализированы графики для остальных случаев. В случае с каплями диаметром 100 мкм (см. рис. 4) при $\rho_d = 0,16$ кг/м³ смесь горит, а при $\rho_d = 0,17$ кг/м³ пламя гаснет.

Также на рис. 3 и 4 можно заметить, что при горении смеси с каплями большего диаметра охлаждение продуктов реакции осуществляется эффективнее. Это объясняется увеличением массовой доли воды в канале и тем, что мелкие капли полностью испаряются во фронте пламени или даже перед ним (при сильном прогревании свежей смеси перед фронтом пламени), в то время как крупные капли могут проникать в область продуктов горения и испаряться в ней, что ведет к ее более эффективному охлаждению, но не гарантирует погасания пламени.

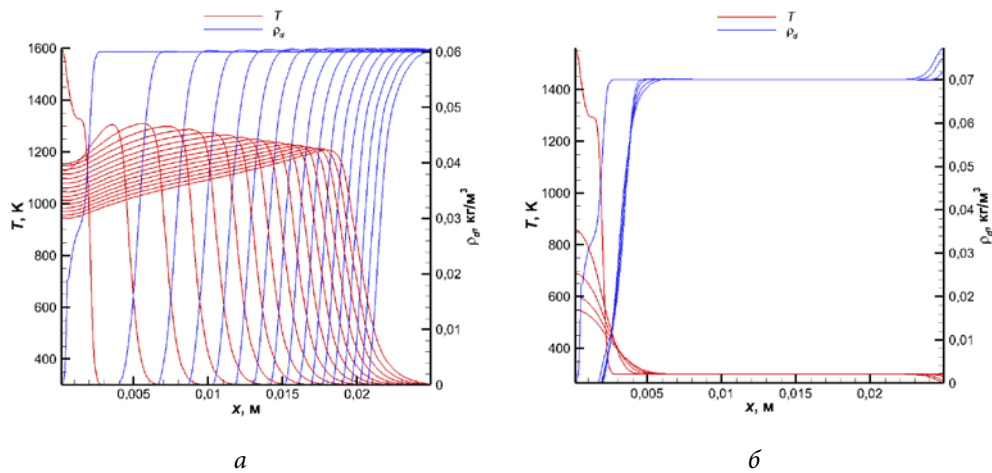


Рис. 3. Профили температуры и массовой плотности жидкой фазы для моментов времени 1, 10 мс и далее с шагом 10 мс при диаметре каплей 25 мкм при $\rho_d = 0,06 \text{ кг/м}^3$ (а) и $\rho_d = 0,07 \text{ кг/м}^3$ (б)

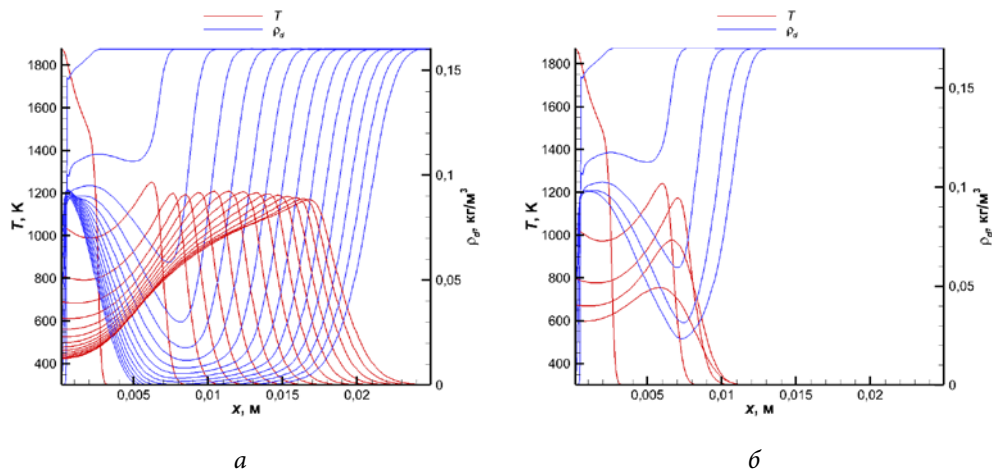


Рис. 4. Профили температуры и массовой плотности жидкой фазы для моментов времени 1, 10 мс и далее с шагом 10 мс при диаметре каплей 100 мкм при $\rho_d = 0,16 \text{ кг/м}^3$ (а) и $\rho_d = 0,17 \text{ кг/м}^3$ (б)

По данным, полученным в результате расчетов задачи о горении газокapпельной смеси в проточном реакторе, были построены графические зависимости скорости подачи смеси и ширины фронта пламени от времени при различных значениях ρ_d (рис. 5, 6).

На рис. 5 представлен график скорости подачи для случая с каплями диаметром 100 мкм. Видно, что при $\rho_d = 5,0 \cdot 10^{-2}$ и $6,0 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$ скорость подачи свежей смеси выходит на стационарные значения, что соответствует установившемуся режиму горения, а для случаев с значением плотности жидкой фазы больше $6,0 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$ скорость подачи быстро падает до нулевого значения,

что говорит о гашении пламени. Аналогично пределы горения определялись для случаев с каплями другого размера.

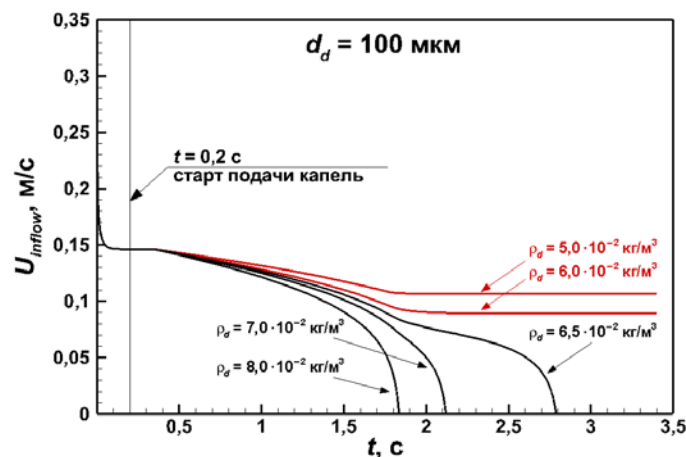


Рис. 5. Зависимость скорости притока смеси от времени при различных значениях ρ_d для случая с каплями диаметром 100 мкм

Зависимость ширины фронта пламени от времени для случая с каплями диаметром 100 мкм приведена на рис. 6. На основе графиков, изображенных на рис. 6, можно заключить, что существует предельное значение ширины фронта пламени, которое составляет примерно 0,5 мм. Было обнаружено, что для случаев с разными значениями диаметра капель предельное значение ширины фронта оказывается одинаковым.

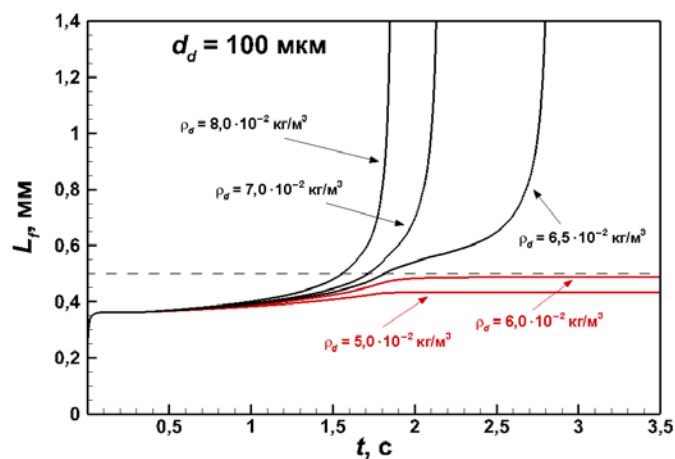


Рис. 6. Зависимость ширины фронта пламени от времени при различных значениях ρ_d для случая с каплями диаметром 100 мкм

Пределы горения. На основе проведенных расчетов были получены зависимости предельной массовой плотности жидкой фазы от диаметра капель воды для двух случаев горения смеси водорода с воздухом, описанных выше. Они

представлены на рис. 7. Видно, что в обоих случаях предельная плотность жидкой фазы монотонно возрастает при повышении диаметра. То есть для прекращения процесса горения при большем размере капель необходимо большее количество воды. Однако в случае горения в проточном реакторе предельные значения плотности оказываются ниже, чем при горении в канале заполненном газок капельной смесью. Это объясняется тем, что при распространении пламени в канале от закрытого конца формируемый в результате расширения продуктов горения поток газа отталкивает капли от фронта пламени, в то время как в проточном реакторе организована направленная подача газок капельной смеси во фронт горения. Направленное течение газовой смеси нивелирует эффект потока, формирующегося в неподвижной среде при распространении пламени. Данный результат показывает, что средства пожаротушения с активной подачей капель в область выделения энергии обладают большой эффективностью.

Наибольшей эффективностью подавления пламени обладают капли малого диаметра. Это связано с тем, что маленькие капли полностью испаряются во фронте пламени, препятствуя повышению температуры и разбавляя горючую смесь парами воды в зоне реакции. Такой же вывод о высокой эффективности испарения капель в зоне зарождения пламени был получен в работе Yang и Kee [12] при исследовании влияния водяного тумана на горение смеси метана и воздуха.

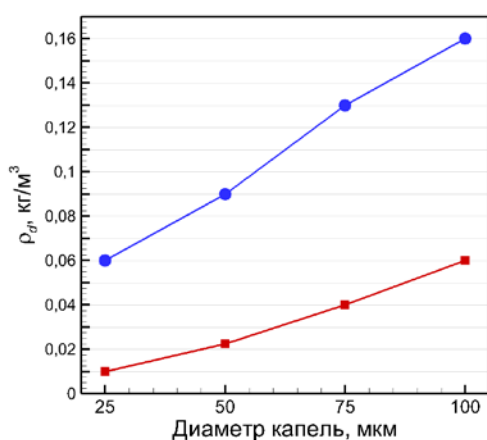


Рис. 7. Зависимости предельной плотности жидкой фазы от диаметра капель в случае направленного потока газок капельной взвеси на фронт пламени в проточном реакторе (показано красным) и в случае распространения пламени в одномерном канале, заполненном горючей смесью с каплями воды, от закрытого конца (показано синим)

Заключение. В данной работе проведено исследование распространения пламени в газок капельных смесях, в результате которого были определены пределы горения газок капельной водородовоздушной смеси с мольным содержанием водорода 15 %. На основе полученных результатов были сделаны следующие выводы:

- 1) при использовании капель воды малого диаметра для прекращения процесса горения необходимо затратить меньшее количество жидкости, чем при использовании крупных капель;
- 2) для лучшего охлаждения продуктов реакции при горении газок капельной смеси, следует использовать крупные капли;

3) в случае направленного потока газок капельной взвеси на фронт пламени в проточном реакторе, пределы горения смеси отличаются от случая распространения пламени в канале с неподвижными взвешенными каплями. Гашение пламени наблюдается при меньшей массовой концентрации капель, что говорит о большей эффективности средств пожаротушения с активной подачей капель в область выделения энергии.

Литература

- [1] Abe J.O., Popoola A.P.I., Ajenifuja E. et al. Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendation. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2019, vol. 44, no. 2, pp. 15072–15086. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- [2] Venetsanos A.G., Huld T., Adams P. et al. Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment. *J. Hazard Mater.*, 2003, vol. 105, no. 1-3, pp. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2003.05.001>
- [3] Joseph-Auguste C., Cheikhvat H., Djebai`li-Chaumeix N. et al. On the use of spray systems: an example of R&D work in hydrogen safety for nuclear applications. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2009, vol. 34, no. 14, p. 5970–5975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.01.018>
- [4] Grant G., Brenton J., Drysdale D. Fire suppression by water sprays. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2000, vol. 26, no. 2, pp. 79–130. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00012-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00012-X)
- [5] Thomas G.O., Jones A., Edwards M.J. Influence of water sprays on explosion development in fuel-air mixtures. *Combust. Sci. Technol.*, 1991, vol. 80, no. 1-3, pp. 47–61. DOI: <https://doi.org/10.1080/00102209108951776>
- [6] Thomas G.O., Edwards M.J., Edwards D.H. Studies of detonation quenching by water sprays. *Combust. Sci. Technol.*, 1990, vol. 71, no. 4-6, pp. 233–245. DOI: <https://doi.org/10.1080/00102209008951634>
- [7] van Wingerden K., Wilkins B., Bakken J. et al. The influence of water sprays on gas explosions. Part 2: mitigation. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 1995, vol. 8, no. 2, p. 61–70. DOI: [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(95\)00007-N](https://doi.org/10.1016/0950-4230(95)00007-N)
- [8] Boeck L., Kink A., Oezdin D. et al. Influence of water mist on flame acceleration, DDT and detonation in H₂-air mixtures. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2015, vol. 40, no. 21, pp. 6995–7004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.129>
- [9] Tsai S.S., Liparulo N.J. Fog inerting criteria for hydrogen/air mixtures. Tech. Rep. CONF-821026e. Palo Alto, Electric Power Research Inst., 1982.
- [10] Medvedev S.P., Gel'fand B.E., Polenov A.N. et al. Flammability limits for hydrogen-air mixtures in the presence of ultrafine droplets of water (fog). *Combust. Explos. Shock Waves*, 2002, vol. 38, no. 4, pp. 381–386. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016277028276>
- [11] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R. et al. Fire dynamics simulator technical reference guide. Vol. 1. Mathematical model. NIST, 2019.
- [12] Yang W., Kee R.J. The effect of monodispersed water mists on the structure, burning velocity, and extinction behavior of freely propagating, stoichiometric, premixed methane-air flames. *Combust. Flame*, 2002, vol. 130, no. 4, pp. 322–335. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00382-6](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00382-6)

Лобов Константин Сергеевич — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Яковенко Иван Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лобов К.С. Нахождение пределов горения газозвеси на основе водорода с микрокаплями воды. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 08(61). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-08-726>

FINDING THE COMBUSTION LIMITS OF A GAS SUSPENSION BASED ON HYDROGEN WITH WATER MICRODROPLETS

K.S. Lobov

koc.99@mail.ru

SPIN-code: 1415-3165

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study of flame propagation in a depleted hydrogen-air mixture with water droplets was carried out using the methods of numerical simulation. It is especially important for fire safety applications, in particular, for the storage and transportation of hydrogen and nuclear power. Two cases are considered: flame propagation in a channel filled with a premixed hydrogen-air mixture with initially immobile water droplets, and combustion of a gas-droplet suspension during its directed supply to the reaction zone in a flow reactor. The combustion limits are determined for each case. It was found that small-diameter water droplets make it possible to extinguish the flame more efficiently, and also that large-diameter droplets at certain concentrations contribute to the rapid cooling of the reaction products. It has been established that with a directed supply of a gas-droplet mixture to the reaction zone, fire extinguishing is observed at a lower mass concentration of droplets than in the case of flame propagation in a channel with stationary suspended droplets.

Keywords

Combustion of a depleted hydrogen-air mixture, water droplets, combustion in a channel, combustion in a flow reactor, combustion limits, fire safety, continuous two-speed two-temperature model, numerical simulation

Received 05.07.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Abe J.O., Popoola A.P.I., Ajenifuja E. et al. Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendation. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2019, vol. 44, no. 2, pp. 15072–15086. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- [2] Venetsanos A.G., Huld T., Adams P. et al. Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment. *J. Hazard Mater.*, 2003, vol. 105, no. 1-3, pp. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2003.05.001>
- [3] Joseph-Auguste C., Cheikhvat H., Djebai`li-Chaumeix N. et al. On the use of spray systems: an example of R&D work in hydrogen safety for nuclear applications. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2009, vol. 34, no. 14, p. 5970–5975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.01.018>
- [4] Grant G., Brenton J., Drysdale D. Fire suppression by water sprays. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2000, vol. 26, no. 2, pp. 79–130. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00012-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00012-X)
- [5] Thomas G.O., Jones A., Edwards M.J. Influence of water sprays on explosion development in fuel-air mixtures. *Combust. Sci. Technol.*, 1991, vol. 80, no. 1-3, pp. 47–61. DOI: <https://doi.org/10.1080/00102209108951776>

-
- [6] Thomas G.O., Edwards M.J., Edwards D.H. Studies of detonation quenching by water sprays. *Combust. Sci. Technol.*, 1990, vol. 71, no. 4-6, pp. 233–245. DOI: <https://doi.org/10.1080/00102209008951634>
- [7] van Wingerden K., Wilkins B., Bakken J. et al. The influence of water sprays on gas explosions. Part 2: mitigation. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 1995, vol. 8, no. 2, p. 61–70. DOI: [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(95\)00007-N](https://doi.org/10.1016/0950-4230(95)00007-N)
- [8] Boeck L., Kink A., Oezdin D. et al. Influence of water mist on flame acceleration, DDT and detonation in H₂-air mixtures. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2015, vol. 40, no. 21, pp. 6995–7004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.129>
- [9] Tsai S.S., Liparulo N.J. Fog inerting criteria for hydrogen/air mixtures. Tech. Rep. CONF-821026e. Palo Alto, Electric Power Research Inst., 1982.
- [10] Medvedev S.P., Gel'fand B.E., Polenov A.N. et al. Flammability limits for hydrogen-air mixtures in the presence of ultrafine droplets of water (fog). *Combust. Explos. Shock Waves*, 2002, vol. 38, no. 4, pp. 381–386. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016277028276>
- [11] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R. et al. Fire dynamics simulator technical reference guide. Vol. 1. Mathematical model. NIST, 2019.
- [12] Yang W., Kee R.J. The effect of monodispersed water mists on the structure, burning velocity, and extinction behavior of freely propagating, stoichiometric, premixed methane-air flames. *Combust. Flame*, 2002, vol. 130, no. 4, pp. 322–335. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00382-6](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00382-6)

Lobov K.S. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Yakovenko I.S., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Lobov K.S. Finding the combustion limits of a gas suspension based on hydrogen with water microdroplets. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 08(61). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-08-726.html> (in Russ.).