

УДК 534.222.2

РАЗВИТИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ВО ВСПЕНЕННЫХ ЭМУЛЬСИЯХ

© 2022 г. И. С. Яковенко*, А. Д. Киверин

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: yakovenko.ivan@bk.ru

Поступила в редакцию 21.11.2021 г.

После доработки 17.01.2022 г.

Принята к публикации 15.02.2022 г.

Работа посвящена расчетно-теоретическому анализу процессов воспламенения и нестационарного горения вспененной эмульсии на водной основе, содержащей гептан. Сформулированы основные механизмы, определяющие развитие горения вспененных эмульсий в полуоткрытых каналах при воспламенении вблизи открытого конца. Выявлена роль начальной стадии воспламенения в формировании струйного течения, которое определяет разрушение пены и последующее нестационарное развитие горения. Показано, что осциллирующий характер изменения скорости горения вызван формированием вторичных очагов воспламенения капель эмульсии на боковой поверхности струи.

DOI: 10.31857/S0040364422030036

ВВЕДЕНИЕ

Использование и разработка альтернативных видов топлива, в том числе водонасыщенных, представляет большой интерес для современных задач эффективной и безопасной энергетики [1]. Присутствие воды в форме капель [1] в составе эмульсионного топлива [2] или пара [3] определяет наличие дополнительных тепловых потерь и изменение состава смеси, что позволяет снизить выбросы оксидов углерода, оксидов азота и сажи благодаря снижению температуры продуктов горения. Горение эмульсионных топлив также может быть применено для разработки технологий устранения последствий разливов нефти и утилизации бытовых отходов.

В статье [4] впервые предложен новый тип топлива — горючая вспененная эмульсия, которая представляет собой двухфазную систему, получаемую из эмульсии типа “масло в воде” путем вспенивания кислородом. Важным отличием данного топлива от известных ранее горючих пен на водной основе [5] является то, что жидкая фаза в случае вспененных эмульсий также содержит топливо. Это определяет как условия устойчивости самой пены, так и механизмы ее разрушения и развития горения. В то же время горючие вспененные эмульсии имеют ряд уникальных свойств, в том числе относительно широкие пределы горения. Так, самоподдерживающееся горение вспененной эмульсии возможно даже при относительноном содержании воды около 90 мас. %. Данный факт был подтвержден экспериментально и связан с естественным разделением зоны горения и зоны теп-

лопотерь на испарение воды. Как было ранее показано в [6], горение вспененной эмульсии возможно лишь в случае пен на основе углеводородов с положительным коэффициентом выхода $E = \sigma_w + \sigma_{w/o} - \sigma_o$, где σ_w — поверхностное натяжение водного раствора поверхностно-активного вещества, σ_o — поверхностное натяжение масла, $\sigma_{w/o}$ — поверхностное натяжение на границе раздела вода—масло. Положительное значение $E > 0$ определяет условия выхода углеводорода на поверхность воды. В результате при распространении пламени пена разрушается на капли эмульсии с внутренним ядром из воды, покрытым пленкой масла. Пленки масла сгорают во фронте пламени, в то время как водяное ядро начинает испаряться позже, только в области продуктов горения. Таким образом, области горения и испарения инертного ядра капель оказываются разнесены в пространстве, что и определяет широкие пределы горения газозвеси на основе эмульсионных капель типа “масло в воде” [7].

Ввиду уникальных свойств топлив на основе вспененных эмульсий, выявленных в серии работ [4, 6, 8], представляется перспективным использование таких топлив для организации сжигания водонасыщенных углеводородов [9]. Однако для разработки реальных технологических решений важно предварительно определить условия, необходимые для устойчивого горения вспененных эмульсий. Решение этой задачи должно быть основано на всестороннем анализе большого числа факторов, в том числе геометрии реактора, методов подготовки эмульсии и пены, системы ини-

циирования горения и многих других. Так, анализ полученных ранее результатов по горению вспененных эмульсий на основе различных углеводородов [6, 8, 9] показывает, что установлению квазистационарного режима горения всегда предшествует стадия нестационарного развития горения. При этом скорость распространения пламени на нестационарной стадии может достигать экстремально больших значений.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей воспламенения и распространения пламени во вспененных эмульсиях методами численного моделирования. Приведены результаты расчетно-теоретического анализа развития горения вспененных эмульсий в канале при инициировании горения вблизи открытого торца пилотным пламенем. Приведено детальное описание структуры фронта горения на различных стадиях процесса. Полученные результаты расширяют представления о горении вспененных эмульсий и имеют большое прикладное значение для дальнейшего использования данного перспективного вида топлива и разработки реакторов нового типа.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассматривается процесс горения пены на основе эмульсии гептана в воде внутри вертикальной трубки диаметром 15 мм и длиной 40 мм (рис. 1).

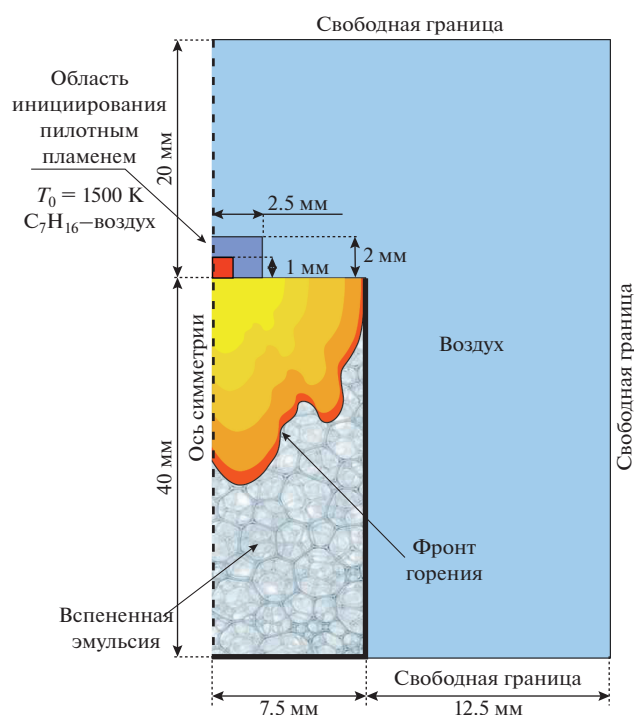


Рис. 1. Постановка задачи численного моделирования воспламенения и нестационарного развития горения вспененной эмульсии на основе воды с гептаном в полуоткрытом канале.

Инициирование горения пилотным пламенем протекает в результате предварительного испарения гептана с поверхности пены и последующего воспламенения полученной газовой смеси. В рамках вычислительного эксперимента воспламенение пены у открытого конца канала моделировалось путем задания стехиометрической гептан-воздушной смеси вблизи поверхности пены и локального нагрева внутри этой области до температуры $T_0 = 1500$ К. После воспламенения пламя распространяется по пене сверху вниз в направлении закрытого торца. Параметры рассматриваемой вспененной эмульсии выбирались в соответствии с данными эксперимента [9]. В частности, коэффициент расширения пены составлял 11.6, коэффициент выхода $E > 0$, что обеспечивает формирование эмульсионных капель с углеводородной пленкой поверх водяного ядра, средний размер пузырей кислорода — 200 мкм, средний размер капель гептана в эмульсии — 40 мкм, объемная концентрация гептана в эмульсии — 5%.

На сегодняшний день в литературе представлено несколько подходов к моделированию интенсивных динамических процессов в пенах [10, 11]. В настоящей работе для описания динамики среды внутри двумерной области, занятой пеной, выбрана двухтемпературная двухскоростная континуальная модель [10]. Распад пены моделировался в соответствии с эмпирическим критерием на основе относительной массы газа в пене. При нагреве пены, с одной стороны, расширяется газ внутри пузырьков, а с другой, происходит испарение жидких пленок. Оба эти процесса определяют изменение массовой доли газа в пене α_g . В ходе расчетов предполагается, что по достижении критерия $\alpha_g > 0.96$ пена распадается на газокпельную смесь. Кроме того, пена разрушается в результате динамического воздействия, описываемого критерием $We > 350$, накладываемым на число Вебера, которое рассчитывается для эффективной капли с диаметром, равным характерной толщине жидкой пленки. Критическое значение числа Вебера выбрано в соответствии с оценками, предложенными в работах [12, 13]. Предполагалось, что в результате распада пены образуются эмульсионные капли диаметром 140 мкм в соответствии с размером канала Плато в пене со средним размером пузыря ≈ 200 мкм. Толщина пленки гептана относительно общего диаметра капли оценивалась исходя из объемного содержания гептана в эмульсии. Кинетика горения гептана описывалась одноступенчатой моделью [14]. В рамках модели стенки канала предполагались адиабатическими, потери тепла на излучение не учитывались.

Расчеты проводились с использованием вычислительного алгоритма для течений с малым числом Маха [15]. Используемая вычислительная

модель ориентирована на моделирование относительно слабых газодинамических процессов в пене, где эффектами, связанными со сжимаемостью пен, можно пренебречь. Применение расчетной методики выполнено на базе вычислительного комплекса NRG, использованного авторами ранее для решения широкого круга задач динамики реагирующих сред [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрены процессы воспламенения и горения вспененной эмульсии в канале. При контакте пилотного пламени с поверхностью пены происходит ее локальное разрушение с формированием газовзвеси из эмульсионных капель и воздуха. Далее под действием пилотного факела капли в газовзвеси испаряются, что ведет к образованию облака горючей газовой смеси. В результате воспламенения газовой смеси образуется струйное течение горячих продуктов горения, направленное внутрь трубы (рис. 2а). Горячая струя разрушает пену, которая распадается на горючую газокпельную взвесь. Полученная взвесь воспламеняется, и за головной частью струи 1 формируется фронт горения 2 (рис. 2). Правая граница рисунков – стенка канала, левая граница – ось симметрии. Координата $y = 0$ мм соответствует верхнему открытому торцу канала. Струя взаимодействует с пеной только в направлении своего

распространения, поэтому вблизи стенок канала пена остается нетронутой. Струйный характер течения определяет увеличение массовой плотности капель в головной части струи, а боковое струйное течение переносит капли в направлении открытого конца трубки. Данные особенности течения согласуются с наблюдаемыми в эксперименте [9], где было зарегистрировано направленное движение капель в области продуктов горения. Воспламенение капель в вихревом потоке приводит к формированию вторичных очагов горения за основным фронтом пламени (очаги 3 и 4 на рис. 2в, 2г).

Возникновение новых очагов горения может оказывать влияние на основной фронт пламени, как это происходит на примере очага 3. В рассмотренном случае основной фронт горения со временем затухает, так как на фоне относительно слабой химической активности газокпельной взвеси процесс испарения становится доминирующим, энерговыделение в процессе горения не компенсирует потери на испарение пленок гептана с поверхности эмульсионных капель. Однако вторичные очаги горения 3, подхваченные вихревым потоком, взаимодействуют с основным фронтом пламени 2, что определяет формирование нового устойчивого фронта горения и поддерживает движение струи 1. Данный механизм объясняет осциллирующий характер изменения скорости распространения пламени в пене (рис. 3). Следует от-

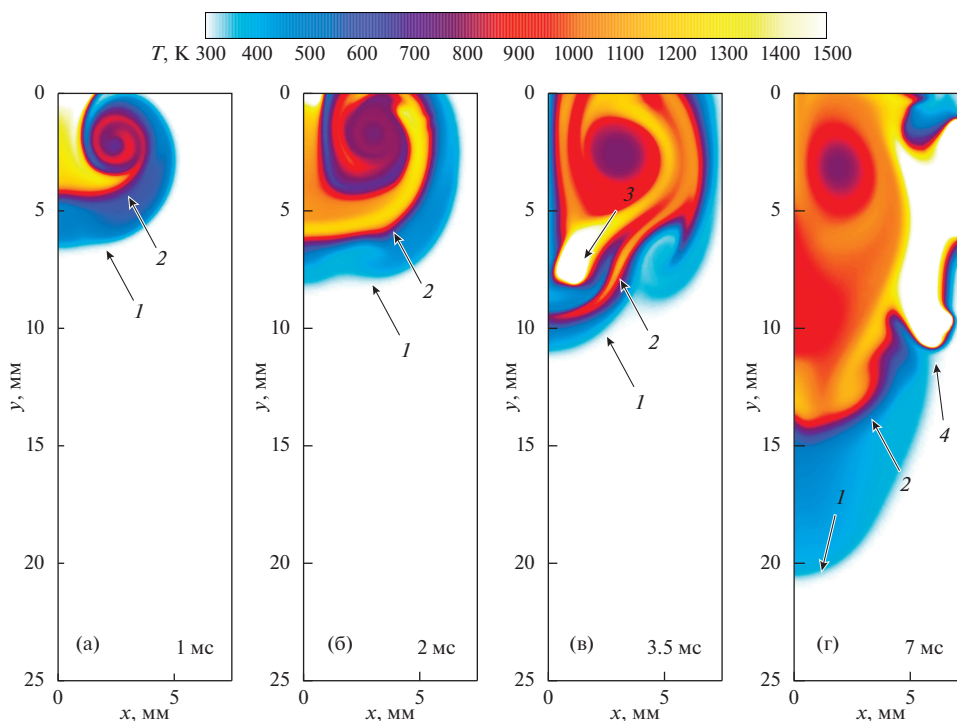


Рис. 2. Эволюция фронта пламени в пене: (а)–(г) – поля температуры в разные моменты времени; показана верхняя часть канала.

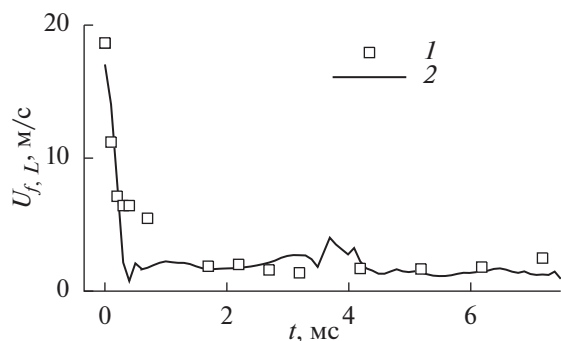


Рис. 3. Хронограммы скорости фронта горения во вспененной эмульсии, полученные экспериментально в [6] (1) и численно в настоящей работе (2).

метить, что условия зажигания определяют интенсивность начального струйного течения, но при этом почти не оказывают влияния на развитие последующей квазистационарной стадии процесса. В рамках исследования были проведены расчеты с варьированием энергии зажигания в диапазоне 0.4–1.2 мДж. Результаты этих расчетов показали, что скорости пламени на квазистационарной стадии изменяются в диапазоне от 1.0 до 2.5 м/с, что охватывает область изменения скорости квазистационарного пламени во времени в эксперименте и в расчете. Важно отметить, что не все очаги горения на периферии струйного течения влияют на ведущую точку фронта пламени. В канале возникают также очаги, расположенные вблизи стенок (очаг 4 на рис. 2г). Эти очаги обеспечивают догорание пены во всем сечении канала, наблюдаемое в эксперименте на начальной нестационарной стадии горения [9].

При дальнейшем распространении в глубь пены струя формирует полость в центральной области трубки, заполненную газокапельной смесью. При этом важно отметить, что струйное течение организовано парокапельной смесью с содержанием продуктов горения и температура в струе имеет более высокие значения, чем температура испарения гептана и воды. В таких условиях пламя представляет собой фронт горения газообразной смеси, сформированной в результате испарения углеводородных оболочек с поверхности эмульсионных капель. Если скорость горения такой смеси оказывается ниже скорости струи, тогда пламя будет замедляться ввиду насыщения горючей смеси парами воды или избыточным количеством испарившегося топлива. Более того, при распространении в полости пламя ограничено слоем пены на стенках канала (рис. 2). Потери тепла на испарение оставшейся вблизи стенок канала жидкости также способствуют ингибированию горения. В результате пламя затухает, что наблюдается в натурном эксперименте на поздних стадиях развития горения. В более химически ак-

тивных средах химическая кинетика определяет более высокую скорость распространения пламени. Фронт горения соединяется с головной частью струи, и торможения пламени не наблюдается. Такой режим был получен в пенах с большим содержанием гептана в эмульсии [9]. При этом температура горения в таких пенах оказывается выше, что способствует реализации механизма взрывного вскипания, обеспечивающего дополнительное ускорение волны горения [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована динамика развития пламени в горючей вспененной эмульсии. На основе численного анализа и сопоставления результатов расчетов с данными эксперимента показано, что особенности воспламенения и геометрии реактора играют большую роль в процессе формирования самоподдерживающегося горения пены. Так, воспламенение у открытого конца канала определяет инициирование горения в режиме нестационарного высокоскоростного распространения пламени. В случае малого содержания горючего в пене высокоскоростная волна горения вырождается в медленное самоподдерживающееся горение или даже затухает. Быстрое развитие процесса на начальной стадии связано с возникновением струйного течения в центральной части канала. В результате распада пены под действием струи горячих продуктов горения формируется газокапельная взвесь, которая стораит на масштабах основного фронта пламени. Если скорость горения оказывается меньше, чем скорость, с которой струйное течение продвигается в глубь пены, горение затухает. В этом случае неиспарившиеся капли сносятся потоком на боковую поверхность струи и догорают в области продуктов горения за основным фронтом пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.). В исследовании использовано оборудование Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова с применением вычислительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.

Авторы выражают благодарность Б.В. Кичатову и А.М. Коршунову за плодотворные обсуждения, а также М.А. Мальцеву и И.В. Морозову за подготовку стилевого файла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anufriev I.S., Kopyev E.P. Diesel Fuel Combustion by Spraying in a Superheated Steam Jet // Fuel Process. Technol. 2019. V. 192. P. 154.
2. Вараксин А.Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и ре-

- зультаты исследований // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 646.
3. Гордин К.А., Масленников В.М., Филимонова Е.А. Оценка уровня эмиссии оксидов азота при подаче пара с природным газом в камеру сгорания газотурбинной установки // ТВТ. 2013. Т. 51. № 6. С. 937.
 4. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Son E. Foamed Emulsion – Fuel on the Base of Water-saturated Oils // Fuel. 2017. V. 203. P. 261.
 5. Babkin V., Kakutkina N., Zamaschikov V. Characteristics of Water-base Foam Combustion // Symp. (Int.) Combust. 1994. V. 25. P. 1627.
 6. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A. Combustion of Foamed Emulsion with a High Content of Water // Proc. Combust. Inst. 2019. V. 37. № 3. P. 3417.
 7. Яковенко И.С., Киверин А.Д., Кориунов А.М., Кичатов Б.В. Пределы горения вспененной эмульсии с высоким содержанием воды // Письма в ЖТФ. 2019. № 24. P. 25.
 8. Kichatov B., Korshunov A., Son K., Son E. Combustion of Emulsion-based Foam // Combust. Flame. 2016. V. 172. P. 162.
 9. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Medvetskaya N. Combustion of Foamed Emulsion Prepared via Bubbling of Oxygen-nitrogen Gaseous Mixture Through the Oil-in-water Emulsion // Fuel Process. Technol. 2019. V. 186. P. 25.
 10. Faure S., Ghidaglia J.M. Violent Flows in Aqueous Foams I: Physical and Numerical Models // Europ. J. Mech. – B/Fluids. 2011. V. 30. № 4. P. 341.
 11. Суров В.С. Анализ волновых явлений в газожидкостных средах // ТВТ. 1998. Т. 36. № 4. С. 624.
 12. Tonini S., Gavaises M., Theodorakakos A. The Role of Droplet Fragmentation in High-pressure Evaporating Diesel Sprays // Int. J. Therm. Sci. 2009. V. 48. № 3. P. 554.
 13. Boiko V.M., Poplavski S.V. Experimental Study of Two Types of Stripping Breakup of the Drop in the Flow Behind the Shock Wave // Combust., Explos. Shock Waves. 2012. V. 48. № 4. P. 440.
 14. Pope D.N., Gogos G. Numerical Simulation of Fuel Droplet Extinction due to Forced Convection // Combust. Flame. 2005. V. 142. № 1–2. P. 89.
 15. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S. et al. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. V. 1. Mathematical Model. Tech. Rep. NIST Spec. Publ. 1018-1. Gaithersburg, MD: U.S. Department of Commerce, NIST, 2019.
 16. Киверин А.Д., Яковенко И.С. Высокоскоростные режимы распространения пламени в канале и переход к детонации // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 707.