

УДК 534.222.2

УСИЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА И ТРИЭТИЛАЛЮМИНИЯ

© 2024 г. С. М. Фролов^{1,*}, И. О. Шамшин¹, К. А. Бырдин¹, К. А. Авдеев^{1,**},
В. С. Аксенов¹, академик РАН П. А. Стороженко², Ш. Л. Гусейнов²

Поступило 19.04.2024 г.

После доработки 19.04.2024 г.

Принято к публикации 01.08.2024 г.

Впервые экспериментально продемонстрирована возможность усиления ударной волны в двухфазной смеси перегретого водяного пара и жидкого триэтилалюминия (ТЭА, $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$). Показано, что тонкая синхронизация момента впрыска ТЭА в поток перегретого водяного пара с моментом прихода затухающей ударной волны позволяет обеспечить незатухающий характер распространения ударной волны в двухфазной среде перегретый водяной пар–ТЭА со скоростью на уровне 1500 м/с.

Ключевые слова: перегретый водяной пар, триэтилалюминий, ударная волна, детонация, импульсно-детонационный двигатель, непрерывно-детонационный двигатель

DOI: 10.31857/S2686740024050034, EDN: HXUDGX

Импульсно-детонационные двигатели (ИДД) и непрерывно-детонационные двигатели (НДД) рассматриваются как перспективные силовые установки для космических и воздушных летательных аппаратов [1, 2], а также для надводных [3] и подводных [4] транспортных средств. В отличие от традиционных двигателей на химическом топливе, основанных на относительно медленном (дозвуковом) управляемом горении топлива в камере сгорания, рабочий процесс в ИДД и НДД основан на быстром (сверхзвуковом) управляемом горении топлива в импульсных и непрерывных детонационных волнах соответственно. Один из важнейших вопросов для таких двигателей — выбор топлива с требуемыми реакционной способностью в паре

с заданным окислителем и экзотермичностью, обеспечивающими устойчивый и энергоэффективный рабочий процесс. Общеизвестно, что использование энергонасыщенных топлив и активных окислителей позволяет получить высокий удельный импульс, особенно если в качестве окислителя используется окружающая среда (воздух или вода).

За исключением нашей работы [5] вопрос об использовании воды в качестве окислителя для ИДД и НДД в литературе никогда ранее не рассматривался. В работе [5] представлены результаты термодинамических расчетов параметров детонации некоторых бор- и алюминий-содержащих соединений в воздухе, воде и диоксиде углерода, которые демонстрируют потенциальную возможность их использования в качестве топлив для перспективных транспортных средств с ИДД и НДД, работающих в атмосфере Земли и в воде. Детонационная способность соединений, содержащих В и Al, изучена недостаточно. Так, в работах [6, 7] измерена скорость детонации смеси диборана с воздухом. В работе

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова
Российской академии наук, Москва, Россия

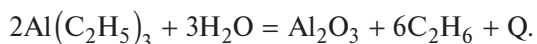
²Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений, Москва, Россия

*E-mail: smfrol@chph.ras.ru

**E-mail: kaavdeev@mail.ru

[8] исследовалась детонация смеси диборана и бензола с воздухом. В экспериментах измерены низкие скорости распространения волны (менее 1000 м/с), что свидетельствовало о нестационарном режиме детонации. В работах [9–11] определены концентрационные пределы взрыва смесей диборана и пентаборана с кислородом. Одно из соединений, рассмотренных в работе [5], – ТЭА – предмет исследования в настоящей работе. Это пирофорное соединение в смеси с триэтилбором (ТЭБ) используется на практике в качестве компонента пускового топлива жидкостных ракетных двигателей [12]. Возможность использования ТЭА в качестве топлива для прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) изучалась в работе [13], где проведены испытания модели ПВРД, работающей на ТЭА, а также на смеси ТЭА с гидридом диэтилалюминия.

Суммарная реакция ТЭА с водяным паром выглядит так:



Учитывая, что стандартные энтальпии образования ТЭА, H_2O (пар), Al_2O_3 и C_2H_6 равны -217.6 , -241.8 , -1676 и -84.67 кДж/моль, тепловой эффект этой реакции составит 511.7 кДж/моль ТЭА или 4.48 МДж/кг ТЭА. Тепловой эффект реакции на 1 кг смеси водяной пар–ТЭА равен 3.63 МДж/кг.

В нашей работе [14] экспериментально исследовались условия самовоспламенения смеси ТЭА+ТЭБ в перегретом водяном паре. Самовоспламенение с последующим распространением пламени происходило при температуре пара 330–340 °С, причем очаг самовоспламенения возникал в месте контакта жидкой струи ТЭА–ТЭБ с поверхностью, нагретой до 500–600 °С.

В работе [5] показано, что термодинамическая скорость детонации в смесях жидкого ТЭА с перегретым водяным паром при начальных температурах до 900 К и давлении 1 бар может достигать 2400 м/с, что близко к скорости детонации стехиометрической метановоздушной смеси при нормальных начальных условиях.

Данная работа рассматривается как продолжение исследования, представленного в работах [5, 14], а ее цель – экспериментально продемонстрировать возможность усиления ударной волны в двухфазной смеси перегретого водяного пара с жидким ТЭА. Постановка эксперимента во многом похожа на постановку эксперимента в [15], где экспериментально изучались условия усиления ударной волны при прохождении зоны форкамерно-факельного зажигания.

Основной элемент экспериментальной установки – обогреваемая (термостатированная) ударная труба (рис. 1) с камерой низкого (атмосферного) давления (КНД) длиной 2.82 м и камерой высокого давления (КВД) длиной 0.6 м, разделенными медной мембраной. Левый конец КНД (см. рис. 1) сообщается с атмосферой, а КВД заполняется метанокислородной взрывчатой смесью при начальном давлении от 0.2 до 0.6 МПа. Через КНД непрерывно прокачивается перегретый водяной пар с температурой от 140 до 180 °С. Чтобы предотвратить конденсацию водяного пара, температура стенок КНД поддерживается на уровне 115–125 °С.

В КНД на расстоянии 1.3 м от мембранного узла размещен распылитель рабочей жидкости с пороховым генератором давления. В качестве рабочей жидкости используются ТЭА, дистиллированная вода, керосин ТС-1 или н-додекан при комнатной температуре (табл. 1). В отличие от ТЭА, который реагирует с водяным

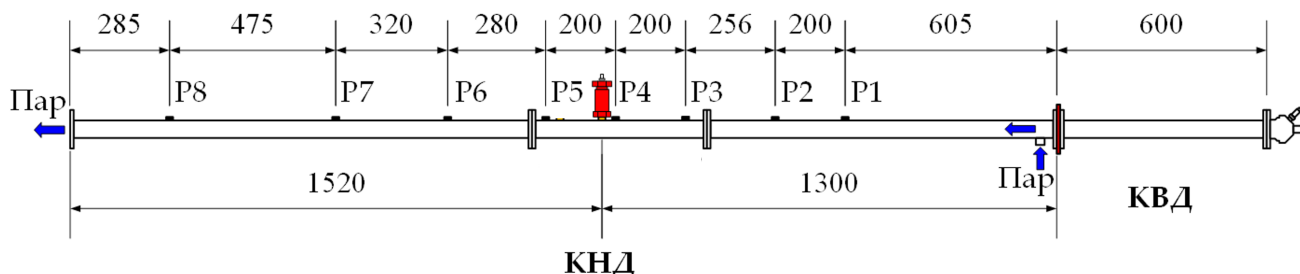


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Таблица 1. Свойства рабочих жидкостей

Жидкость	Плотность, кг/м ³	Температура кипения, К	Теплота испарения, Дж/г	Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м	Вязкость, Па · с
Вода	1000	373	2300	72.7×10^{-3}	1.0×10^{-3}
Керосин ТС-1	780	423–523	267	27.0×10^{-3}	1.5×10^{-3}
н-додекан	745	489	358	25.5×10^{-3}	1.3×10^{-3}
ТЭА	832	459–466	536–641	26.1×10^{-3}	2.5×10^{-3}

паром, другие используемые рабочие жидкости (вода, керосин и н-додекан) с водяным паром не реагируют.

Система регистрации включает 8 высокочастотных датчиков давления Р1–Р8. Погрешность измерения скорости ударной волны по показаниям датчиков давления оценивается в 2%. Эксперимент управляется цифровым блоком управления, а получаемые данные записываются в память персонального компьютера через АЦП QMS20 фирмы R-Technology (Москва, Россия).

Установка обеспечивает генерацию сильной ударной волны (со скоростью до 2.5 км/с) в КНД путем зажигания взрывчатой смеси в КВД и разрыва мембраны, вызванного повышением давления до некоторого критического значения. Высоковольтный импульс на свечу зажигания формируется автомобильной катушкой зажигания при разряде конденсатора емкостью 68 мкФ, заряженного до напряжения 320 ± 10 В, на ее первичную обмотку.

Распылитель рабочей жидкости состоит из медицинского шприца, заполняемого рабочей жидкостью, диафрагмы, порохового заряда и взрывающейся проволоочки. В отличие от других используемых рабочих жидкостей заправка ТЭА в шприц производится в герметичном боксе в инертной среде аргона. Для подрыва проволоочки в распылителе используется электролитический конденсатор номинальной емкостью 6800 мкФ, заряженный до напряжения 220 ± 20 В. Под действием давления пороховых газов распылитель образует две струи, направленные в разные стороны: по направлению к мембране и по направлению к открытому концу КНД. Диаметр отверстий – 2 мм. Объем впрыскиваемой дозы – 2.5 мл. Время полного распыления объема шприца с водой приблизительно равно 3.0 мс, а с керосином и н-додеканом – 4.4 мс. Средние скорости передних границ струй приблизительно равны

170 м/с для воды и 110 м/с для керосина и н-додекана, причем начальные скорости струй всех используемых жидкостей составляют 200–250 м/с. После распыления всего объема рабочей жидкости образуется облако с продольной протяженностью 0.8–1 м.

Эксперименты без впрыска и с впрыском рабочей жидкости проводятся при одинаковых начальных условиях. Единственный варьируемый параметр – это интервал времени между началом впрыска рабочей жидкости и моментом прихода ударной волны в сечение распылителя. Этот интервал времени в дальнейшем называется задержкой прихода ударной волны τ_S . Чтобы обеспечить полное распыление рабочих жидкостей до прихода ударной волны, минимальное значение задержки прихода ударной волны выбиралось равным $\tau_{S,min} = 4$ мс. Максимальное значение задержки прихода ударной волны в экспериментах достигало $\tau_{S,min} = 50$ мс.

На рис. 2 показаны осредненные результаты измерений скорости ударной волны по мере ее распространения в водяном паре без впрыска рабочей жидкости (кривая “Пар”), а также с впрыском воды (кривая “Н₂O”), керосина (кривая “ТС-1”), н-додекана (кривая “C₁₂H₂₆”) и ТЭА (кривая “ТЭА”). Каждой кривой с впрыском рабочей жидкости соответствует некоторое значение задержки прихода ударной волны в миллисекундах, например, “Н₂O, 5 мс” или “ТЭА, 7 мс”. Для каждой кривой осреднение проведено по 4–5 опытам. Положение распылителя рабочей жидкости в КНД показано вертикальной штрихпунктирной линией.

Налицо существенное отличие в поведении ударной волны в водяном паре без впрыска и с впрыском рабочей жидкости. В водяном паре без впрыска рабочей жидкости (кривая “Пар”) скорость ударной волны на измерительном участке длиной 1.6 м монотонно снижается от 1740 до 1170 м/с. Такое снижение скорости

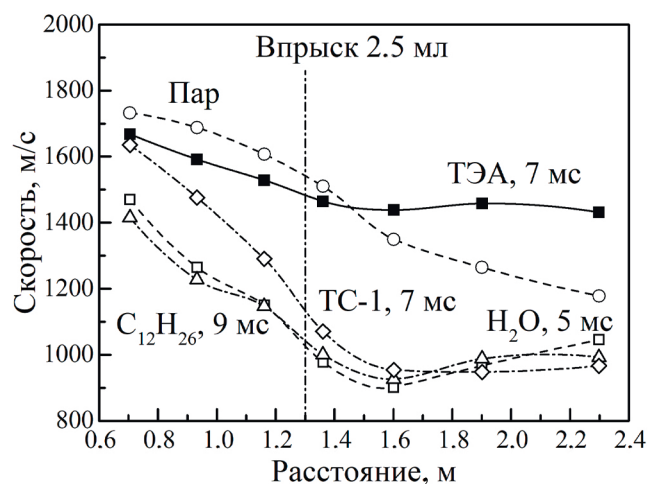


Рис. 2. Измеренные зависимости скорости ударной волны от пройденного расстояния в опытах с одинаковыми начальными условиями. Рабочая среда – водяной пар ($T = 415 \pm 5$ K). Рабочая жидкость – ТЭА, керосин ТС-1, н-додекан, вода. Задержка прихода ударной волны от 5 до 9 мс.

ударной волны в основном вызвано волной разрежения, отраженной от закрытого конца КВД.

При впрыске воды (кривая “ H_2O , 5 мс”), керосина (кривая “ТС-1, 7 мс”) или н-додекана (кривая “ $C_{12}H_{26}$, 9 мс”) ударная волна ослабляется значительно быстрее и до меньшей скорости, чем в водяном паре без впрыска рабочей жидкости. По-видимому, это вызвано дополнительным влиянием двухфазных потерь количества движения и энергии, а также конденсацией водяного пара на холодных каплях этих жидкостей.

При впрыске ТЭА (кривая “ТЭА, 7 мс”) ударная волна на участке КНД до распылителя несколько ослабляется, а затем распространяется по трубе с приблизительно постоянной скоростью 1500 м/с, которая на 500–600 м/с выше, чем при впрыске других жидкостей. Такое поведение кривой для ТЭА однозначно свидетельствует о вкладе энерговыделения в реакции между ТЭА и ударно-сжатым перегретым водяным паром.

На рис. 3 показано сравнение результатов четырех экспериментов с измерением скорости ударной волны в водяном паре с впрыском ТЭА (символы с заливкой) с задержкой прихода ударной волны $\tau_s = 10$ мс с результатами семи экспериментов без впрыска рабочей жидкости (символы без заливки). При такой задержке прихода ударной волны в экспериментах с впрыском ТЭА наблюдается рост скорости ударной волны

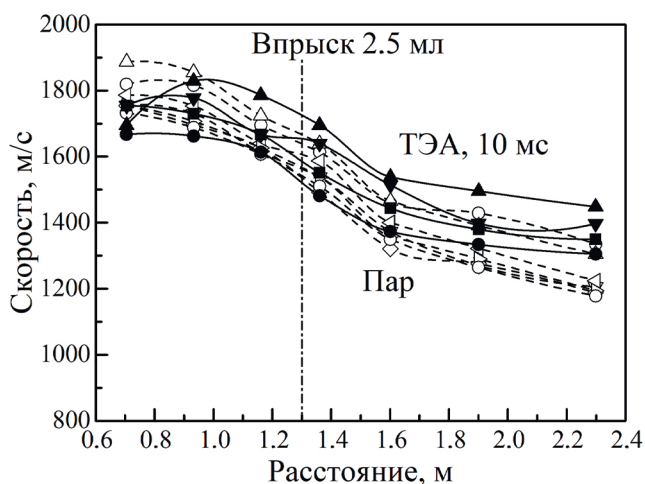


Рис. 3. Измеренные зависимости скорости ударной волны от пройденного расстояния в опытах с одинаковыми начальными условиями. Рабочая среда – водяной пар ($T = 415 \pm 5$ K). В четырех опытах рабочая жидкость – ТЭА (символы с заливкой). Задержка прихода ударной волны 10 мс. В семи опытах (символы без заливки) ударная волна распространяется по перегретому водяному пару без впрыска рабочей жидкости.

на участке до распылителя, а на участке за распылителем ударная волна постепенно замедляется до скорости 1300–1500 м/с.

Наконец, на рис. 4 показаны осредненные результаты измерений скорости ударной волны в водяном паре без впрыска рабочей жидкости и с впрыском ТЭА и воды при задержках

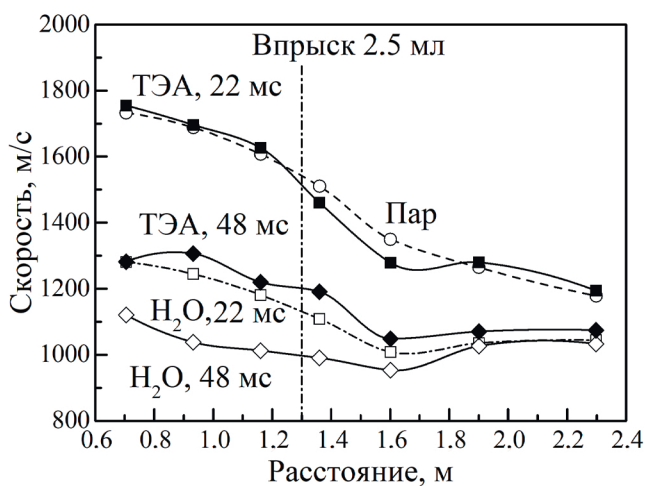


Рис. 4. Измеренные зависимости скорости ударной волны от пройденного расстояния в опытах с одинаковыми начальными условиями. Рабочая среда – водяной пар ($T = 415 \pm 5$ K). Рабочая жидкость – ТЭА или H_2O . Задержка прихода ударной волны 22 и 48 мс.

прихода ударной волны $\tau_s = 22$ и 48 мс. Здесь максимальное превышение скорости ударной волны на кривой “ТЭА, 22 мс” над скоростью на кривой “Н₂O, 22 мс” еще достигает 400–500 м/с, тогда как максимальное превышение скорости ударной волны на кривой “ТЭА, 48 мс” над кривой “Н₂O, 48 мс” уже сокращается до 200 м/с.

Совместное рассмотрение кривых “ТЭА” на рис. 2–4 показывает, что задержка прихода ударной волны играет ключевую роль в явлении усиления ударной волны при прохождении через облако капель ТЭА. Тот факт, что при $\tau_s = 7$ мс ударная волна ослабляется до распылителя и распространяется с постоянной скоростью после распылителя (см. рис. 2), а при $\tau_s = 10$ мс ускоряется до распылителя и постепенно ослабляется после распылителя (см. рис. 3), означает, что значение $\tau_s \approx 7$ мс близко к оптимальному значению, при котором вклад энерговыделения в реакции между ТЭА и ударно-сжатым перегретым водяным паром в интенсивность ударной волны максимален. С увеличением задержки прихода ударной волны возрастает доля ТЭА, прореагировавшего с низкотемпературным водяным паром и, следовательно, вклад энерговыделения в указанной реакции уменьшается.

Таким образом, чтобы обеспечить незатухающий характер распространения ударной волны в двухфазной среде перегретый водяной пар–ТЭА со скоростью на уровне 1500 м/с, необходима тонкая синхронизация момента впрыска ТЭА в поток перегретого водяного пара с моментом прихода затухающей ударной волны. Дальнейшая работа будет направлена на определение условий для перехода ударной волны в детонацию в двухфазной среде перегретый водяной пар–ТЭА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bussing T., Pappas G.* An introduction to pulse detonation engines // AIAA Paper 94-0263, 1994 (Proc. 32nd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 10–13 January 1994, Reno, NV, U.S.A. <https://doi.org/10.2514/6.1994-263>
2. *Bykovskii F.A., Zhdan S.A., Vedernikov E.F.* Continuous spin detonations // J. Propuls. Power 2006. V. 22(6). P. 1204–1216. <https://doi.org/10.2514/1.17656>
3. *Frolov S.M., Platonov S.V., Avdeev K.A., Aksenov V.S., Ivanov V.S., Zangiev A.E., Sadykov I.A., Tukhvatullina R.R., Frolov F.S., Shamshin I.O.* Pulsed combustion of fuel–air mixture in a cavity under the boat bottom: modeling and experiments // Shock Waves. 2022. V. 32(1). P. 11–24. <https://doi.org/10.1007/s00193-021-01046-2>
4. *Frolov S.M., Avdeev K.A., Aksenov V.S., Frolov F.S., Sadykov I.A., Shamshin I.O.* Pulsed detonation hydramjet: Design optimization // J. Marine Sci. Eng. 2022. V. 10. № 1171. <https://doi.org/10.3390/jmse10091171>
5. *Быркин К.А., Фролов С.М., Стороженко П.А., Гусейнов Ш.Л.* Детонационная способность бор- и алюминий-содержащих соединений в воздухе, воде и диоксиде углерода // Горение и взрыв. 2023. Т. 16. № 2. С. 50–70. <https://doi.org/10.30826/CE23160205>
6. *Poling E., Simons H.P.* Explosive reaction of diborane in dry and water-saturated air // Ind. Eng. Chem. 1958. V. 50. № 11. P. 1695–1698. <https://doi.org/10.1021/ie50587a051>
7. *Martin F.J., Kydd P.H., Browne W.G.* Condensation of products in diborane–air detonations // Proc. Symp. (Int.) Combust. 1961. V. 8. № 1. P. 633–644. [https://doi.org/10.1016/s0082-0784\(06\)80555-2](https://doi.org/10.1016/s0082-0784(06)80555-2)
8. *Sample P., Simons H.P.* Explosive reactions of diborane in benzene-saturated air // Ind. Eng. Chem. 1958. V. 50. № 11. 1699–1702. <https://doi.org/10.1021/ie50587a052>
9. *Whatley A.T., Pease R.N.* Observations on thermal explosions of diborane–oxygen mixtures // J. Am. Chem. Soc. 1954. V. 76. No. 7. P. 1997–1999. <https://doi.org/10.1021/ja01636a089>
10. *Baden H.C., Bauer W.H., Wiberley S.E.* The explosive oxidation of pentaborane // J. Phys. Chem. 1958. V. 62. № 3. P. 331–334. <https://doi.org/10.1021/j150561a021>
11. *Bauer W.H., Wiberley S.E.* Explosive oxidation of boranes. In: Borax to Boranes. American Chemical Society, Washington, DC, 1961. P. 115–126. (Advances in Chemistry, 32).
12. *Seedhouse E.* SpaceX: Starship to Mars — The First 20 Years. Cham: Springer, 2022.
13. *Billig F.S.* A study of combustion in supersonic streams. Doctoral dissertation, Univ. of Maryland, MD, USA, 1964.
14. *Кузнецов Н.М., Фролов С.М., Шамшин И.О., Стороженко П.А.* Кинетика взаимодействия капель триэтилалюминия с перегретым водяным паром: эксперимент, физико-химическая модель и схема химических реакций // Горение и взрыв. 2020. Т. 13. № 3. С. 76–81. <https://doi.org/10.30826/CE20130307>
15. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я.* Иницирование детонации при взаимодействии ударной волны с зоной форкамерно-факельного зажигания // ДАН. 2006. Т. 410. № 1. С. 70–74.

AMPLIFICATION OF THE SHOCK WAVE IN A TWO-PHASE MIXTURE OF SUPERHEATED STEAM AND TRIETHYLALUMINUM

S. M. Frolov^a, I. O. Shamshin^a, K. A. Byrdin^a, K. A. Avdeev^a, V. S. Aksenov^a,
Academician of the RAS P. A. Storozhenko^b, Sh. L. Guseinov^b

^a*N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*State Research Center "State Scientific Research Institute of Chemistry and Technology
of Organo-Element Compounds", Moscow, Russia*

The possibility of shock wave amplification in a two-phase mixture of superheated steam and liquid triethylaluminum (TEA, $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$) has been experimentally demonstrated for the first time. Fine synchronization of TEA injection of TEA into a flow of superheated steam with the arrival of an attenuating shock wave is shown to ensure the self-sustaining propagation of the shock wave in the two-phase medium at a speed of about 1500 m/s.

Keywords: superheated steam, triethylaluminum, shock wave, detonation, pulse detonation engine, continuous detonation engine