УДК 536.71; 537.5; 662. 61

СЖИГАНИЕ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ В ВОДЕ В КОЛЬЦЕВЫХ ПУЗЫРЯХ

Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н.

Институт гидродинамики им М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты №№ 13-08-00838, 12-08-31087.

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований сжигания заранее приготовленной стехиометрической смеси пропана с кислородом в кольцевых пузырях, выдуваемых в воду на границе с металлической стенкой. Исследована динамика сжигания газа в стационарно сформированных пузырях и последующие гидродинамические стадии расширения и пульсации пузырей после сгорания пропана. Проведены измерения импульсов силы на граничную твердую стенку в корреляции с киносъемкой гидродинамических процессов.

В работе показано, что непосредственное импульсное сжигание газа в воде обеспечивает усилие на тяговую стенку. Это позволит конструировать движители нового типа с прямым преобразованием химической энергии в кинетическую энергию тела, и избавиться от энергозатратных сложных и промежуточных узлов (двигатель внутреннего сгорания, редуктор, винт).

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] реализован метод сжигания горючих газов непосредственно в воде с раздельной подачей горючего газа и окислителя с помощью линейных щелевых форсунок. Горючая смесь в воде образовывалась в динамическом режиме в виде квазицилиндрического пузыря из двух выдуваемых пузырей. Осуществлены циклические режимы сжигания ацетилена, водорода, пропана и МАФ с частотой до 2,5 Гц.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований сжигания заранее приготовленной стехиометрической смеси пропана с кислородом в кольцевых пузырях, выдуваемых в воду на границе с металлической стенкой. Исследована динамика сжигания газа в стационарно сформированных пузырях и последующие гидродинамические стадии расширения и пульсации пузырей после сгорания пропана. Проведены измерения импульсов силы на граничную твердую стенку в корреляции с киносъемкой гидродинамических процессов.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Пузырьки с заранее заготовленной стехиометрической смесью пропана с кислородом объемом 1-4 см^3 выдувались непосредственно в воду. Пузырек удерживался в воде в кольцевой канавке диаметром 40 мм на жесткой горизонтальной стенке, которой являлся торец цилиндра диаметром 59 мм. Инициирование горючей смеси в пузырьках осуществлялось искровым разрядом с энергией до 4 Дж. На Рис. 1 инициирующий электрод справа. На первом кадре виден искровой разряд.

Проводилась скоростная киносъемка горения газа в пузырьках и динамика расширения пузырей в результате сжигания газовой смеси. Съемка осуществлялась в двух проекциях: с торца цилиндра и сбоку. Синхронно осуществлялись измерения импульсов силы F(t) на горизонтальную стенку, удерживающую пузырь. Регистрация импульсов силы на стенку осуществлялась на цифровом осциллографе TDS-210 с помощью пьезоэлементов ЦТС, имеющих цилиндрическую форму с диаметром 40 мм и высотой 15 мм, и эмиттерного повторителя с постоянной составляющей времени 10 сек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

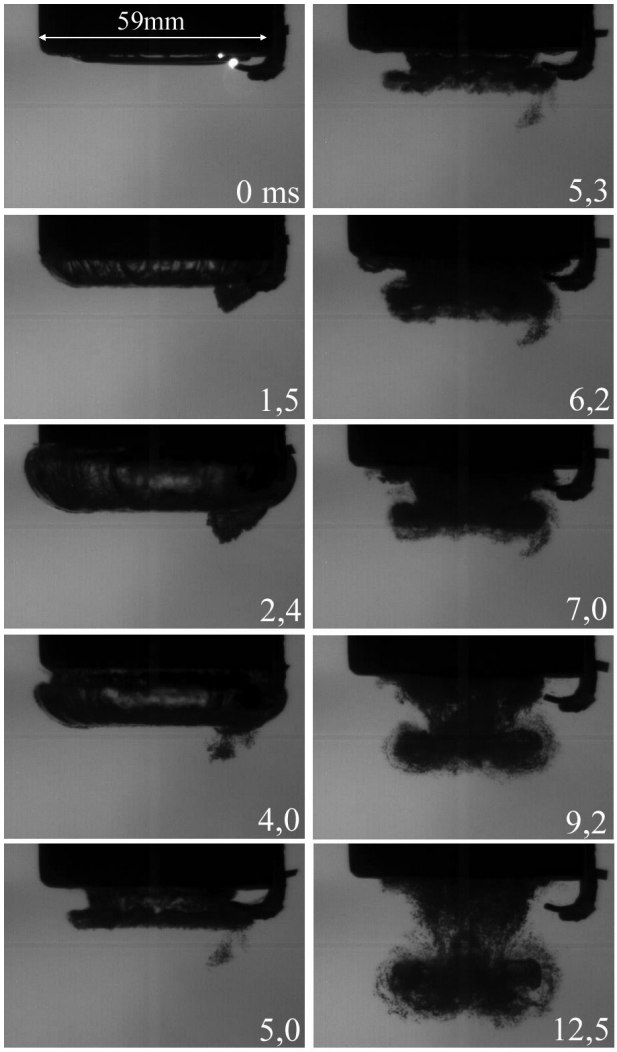

Рис.1 Кадры теневой съемки гидродинамических процессов при сжигании газа в кольцевом пузыре на торце цилиндра.

На Рис. 1 представлены отдельные кадры теневой киносъемки гидродинамических процессов при сжигании стехиометрической смеси пропана с кислородом в кольцевом пузырьке радиусом 40 мм и объемом 3 см^3 на торце цилиндра. Для данной кинограммы цилиндр был не закреплен, поэтому видно его перемещение.

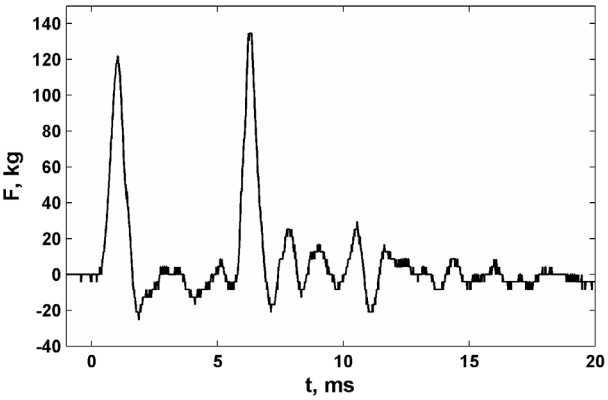

Рис.2 Осциллограммы импульсов силы на жесткую стенку.

На Рис. 2 представлена осциллограмма для импульсов силы, действующих на горизонтальную стенку торца цилиндра, при сжигании 2 см^3 стехиометрической смеси пропана с кислородом. На данной осциллограмме отслеживаются два основных импульса. Первый импульс соответствует процессу расширения пузыря после сгорания газа, а второй импульс соответствует моменту коллапса образованного пузыря. Видно, что второй импульс соизмерим с первым, при этом: $P_1 = \int F_1 dt = 0{,}077$ кГс, $P_2 = \int F_2 dt = 0{,}075$ кГс.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для экспериментов в представленной постановке при прочих равных условиях, скорость горения носит «галопирующий» характер вдоль пузыря. От эксперимента к эксперименту для стехиометрической смеси пропана с кислородом разброс значений скорости фронта горения находился в пределах 100 - 140 м/сек. В целом, этот разброс слабо влияет на динамику расширения и пульсации пузырей. Расширение сгоревшего газа в пузыре обеспечивает первый импульс силы на стенку цилиндра. Второй импульс силы генерируется при коллапсе торообразного или эллипсоидального пузыря. Геометрия образованного пузыря зависит от начального объема горючего газа. Так для начальных объемов газа 1-2 см^3 образуется торообразный пузырь, который коллапсирует радиально к оси тора и симметрично к оси цилиндра (Рис. 1). При коллапсе таких пузырей формируются два противоположных потока жидкости вдоль оси. При на-

чальных объемах газовой смеси более 2 см^3 торообразный пузырь превращается в эллипсоид, “приплюснутый” в направлении к стенке. Такой пузырь коллапсирует радиально к оси стенки с последующим формированием «симметричных» струйных потоков жидкости вдоль оси. На кинограммах поток жидкости от стенки виден как аксиальное течение с образованием кольцевого вихря из мелких пузырьков. Струя, направленная в сторону стенки, отражается от нее и толкает ее вверх (Рис. 1). Этому процессу соответствует второй импульс силы (Рис. 2). После первого коллапса тора или эллипсоидального пузыря наблюдается дробление исходного пузыря с образованием вихря из более мелких пузырьков. Этот кольцевой вихрь из мелких пузырьков, перемещаясь вдоль оси, пульсирует совместно с пузырьками у стенки. Пульсации эти отслеживаются на кинограммах и в виде слабых импульсов на осциллограммах измерений импульсов силы (Рис. 2). Пульсации происходят за счет кооперативных процессов мелких пузырьков в наблюдаемых вихревых кластерах.

Как для динамического смешения горючего газа с кислородом [1], так и для заранее приготовленной смеси в пузырях наблюдаются эффекты стохастичности процессов сгорания газов от эксперимента к эксперименту. Во всех экспериментах (ацетилен, водород, пропан, МАФ) при динамическом смешении газов видимая скорость горения не превышала 400 м/сек. Таким образом, мы имеем дело с дефлаграционным механизмом горения газов в пузыре. Наблюдаемые галопирующие режимы горения, по-видимому, связаны с неустойчивостью границы пузыря, которые отслеживаются на кинограммах и, как следствие, с различием концентраций паро-капельной составляющей воды в пузыре. Изучение влияния паров воды на скорость горения газов являются актуальными задачами для разработки методов сжигания газов в жидкостях.

Наблюдаемая динамика течений в жидкости при расширении и пульсациях пузыря вблизи жесткой стенки качественно подобна процессам струйных течений, описанных в монографии В.К. Кедринского [2] для случаев пульсаций пузыря от взрывов конденсированных ВВ вблизи свободной поверхности жидкости. Важно отметить следующее отличие при взрывах конденсированных ВВ и сжигания газов в воде, которое заключается в том, что нашем случае отсутствуют процессы детонации источника взрыва. Следовательно, перераспределение энергии между кинетической энергией жидкости от расширения газового пузыря и энергией ударной волны будет происходить в пользу пузыря. При этом динамика пульсаций торообразных пузырей [2,3] отлична от динамики сферических пузырей.

ВЫВОД

Экспериментально показано, что сжигание газов в воде вблизи жесткой стенки позволяет выполнять преобразование химической энергии сжигаемой газовой смеси в поступательную составляющую на тяговой стенке за счет импульсов силы, возникающих при расширении продуктов сгорания газа в воде и при захлопывании пузыря. При этом, за счет формирования аксиальных потоков жидкости при захлопывании пузыря вблизи стенки, обеспечивается дополнительный вторичный импульс силы, соизмеримый с первым. Этот эффект указывает на перспективную эффективность преобразования химической энергии газов в механическую энергию тела, погруженного в жидкость.

С помощью рассмотренных методов сжигания газов на тяговой стенке можно исключить потери энергии в существующих сложных устройствах преобразования химической энергии в механическую энергию путем смены технологий сжигания топлив для водных движителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Манжалей В.И., Медведев Р.Н., Ульяницкий В. Ю. Сжигание горючих газов в водном теплоносителе с раздельной подачей горючего и окислителя. // СОВРЕМЕННАЯ НАУКА, Сборник научных статей №2(10), г.Киев, ISSN 2076-6866, «Триакон» - 2012 г,

с. 64-67, http://www.swsl.newmail.ru/publ/teslenko_Alushta2012.pdf Teslenko V.S., Drozhzhin A.P., Manzhaley V.I., Medvedev R.N., Ulyanitskii V.Yu. Combustion of gas fuel in water-based heat carrier with separate fuel and oxygen injection // Modern science, Collection of research papers, No. 2, Vol. 10, Kiev, ISSN 2076-6866, "Triacon", 2012, pp. 64-67.

2. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва эксперимент и модели // Из-во СО РАН, 2000 г., 434 стр. Kedrinskii V.K.. Hydrodynamics of explosion: experiment and models. 2000, 434 p.

3. R.N. Medvedev, A.A. Chernov, D.I. Karpov. Calculations of pulsation period of a toroidal bubble during diaphragm discharge in electrolyte // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, Vol. 64, pp. 743-750. http://www.swsl.newmail.ru/publ/HMT-2013.pdf