

УДК 536.71; 537.5; 662.61

Сжигание газов в воде в линейных и кольцевых пузырях*

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

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

E-mail: teslenko@hydro.nsc.ru

Разработан импульсно-циклический метод сжигания газов в жидкости с отдельной подачей в воду горючего газа и кислорода применительно к разработке новых технологий сжигания топлив для тепловых генераторов и подводных движителей. Представлены результаты calorиметрических и гидродинамических исследований процессов, происходящих в воде при сжигании ацетилена, водорода, пропана с частотой 2–2,5 Гц для линейных инжекторов. Исследована динамика горения стехиометрической смеси пропана ($C_3H_8+5O_2$) на жесткой стенке с последующим расширением и пульсациями газового пузыря для линейных и кольцевых пузырей. Показано, что при сжигании газов в кольцевых пузырях происходит генерация двух соизмеримых импульсов силы на стенку: первого — за счет расширения сгоревшего газа, второго — за счет развития аксиальных кумулятивных процессов при захлопывании пузыря. При этом формируется кольцевой вихрь, который обеспечивает высокоскоростные конвективные процессы между продуктами сгорания и жидкостью с дроблением образованных пузырей.

Ключевые слова: тепловой генератор, подводный движитель, сжигание газа в воде, горение, кольцевой пузырь, импульс силы.

Введение

В настоящее время преобразование химической энергии в тепло осуществляется в разнообразных котельных системах. Котельный принцип сжигания топлив в направлении увеличения удельных мощностей ограничивается проблемами, связанными с возникновением пленочного кипения на стенках котла, что приводит к увеличенным габаритам тепловых систем. В работах [1, 2] был реализован метод импульсно-циклического сжигания горючих газов непосредственно в воде с отдельной подачей горючего газа и окислителя с помощью линейных щелевых форсунок для целей непосредственного нагрева теплоносителя. Горючая смесь газа в воде образовывалась в динамическом режиме в виде квазицилиндрического пузыря из двух выдуваемых пузырей: горючего газа и кислорода. Были осуществлены циклические режимы сжигания ацетилена, водорода, пропана с частотой до 2,5 Гц.

В современных движителях для надводных и подводных средств передвижения используются двигатели внутреннего сгорания или турбины, в которых с помощью разнообразных трансмиссий приводят во вращение гребные винты и водометы. Потери

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 10-08-00788, № 13-08-00838).

энергии на всех системах передачи механического импульса значительны [3]. Перспективными для водных средств являются системы с непосредственной передачей механической энергии от продуктов сгорания в импульсы тяги, например, реактивные двигатели. Однако существующие реактивные двигатели на основе сжигания специальных топлив, для которых окислителем является вода, неприемлемы для широкого использования по соображениям экологической безопасности. Поэтому особый интерес для водного транспорта могут представлять пульсирующие гидрореактивные двигатели. Для пульсирующего двигателя есть возможности метания забортной воды непосредственно продуктами сгорания в виде присоединенной массы при расширении пузырей [4]. При этом предполагается отказаться от всякого рода металлических камер сгорания.

В настоящей работе рассматриваются возможности применения методов импульсного сжигания углеводородов и водорода непосредственно в воде для:

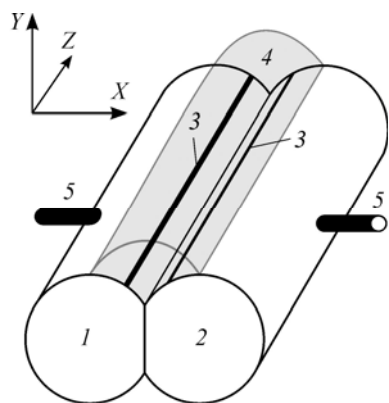
- разработки принципиально новых тепловых генераторов (закрытая система);
- для разработки непосредственного преобразования химической энергии углеводородов в кинетическую энергию тела, погруженного в жидкость (открытая система).

В первом случае работа направлена на создание малогабаритных тепловых генераторов с непосредственной передачей тепла от рабочего тела к теплоносителю, т.е. без теплопередающих стенок котлов. Во втором случае планируется создание пульсирующих двигателей на основе сжигания углеводородов непосредственно в воде на тяговой стенке, т.е. без камеры сгорания.

1. Постановка экспериментов для динамического смещения газов в воде

Раздельный метод инжекции в воду горючего и окислителя в первую очередь необходим для обеспечения безопасности работы данного и подобных устройств. На основании ранее проведенных исследований проблем коалесценции пузырьков для оптимального инициирования зажигания газа в пузырьках при раздельной инжекции в воду горючего и окислителя авторы пришли к выводу, что необходимо отказаться от инжекции газа в воду через круглые отверстия. Был разработан щелевой метод инжекции двух газов в воду с коалесценцией “цилиндрических” пузырей на начальной стадии выдувания горючего газа и кислорода. Получены надежные режимы смещения горючего газа и кислорода в одном квазицилиндрическом пузыре.

В результате разработано и испытано устройство инжекции газов в воду с помощью линейных щелевых форсунок [2]. Схема устройства представлена на рис. 1. В медных цилиндрах 1 и 2 были прорезаны щели 3. Длина щелей — 70 мм, ширина — 0,2 мм. Из одной щели выдувался кислород, а из другой — горючий газ. Газы поступали к щелям через подводящие трубки 5. Расход газов регулировался путём изменения площади поперечного сечения жиклёров и временем открытия клапанов (время подачи газов), установленных в системе газопроводов. При выдувании газов происходил процесс их коалесценции с перемешиванием подаваемых газов и формированием единого пузыря 4 (на рис. 1 выделен серым цветом). Вблизи середины линейных щелей цилиндров 1 и 2 устанавливались изолированные проводники, между торцами которых генерировался



установленных в системе газопроводов. При выдувании газов происходил процесс их коалесценции с перемешиванием подаваемых газов и формированием единого пузыря 4 (на рис. 1 выделен серым цветом). Вблизи середины линейных щелей цилиндров 1 и 2 устанавливались изолированные проводники, между торцами которых генерировался

Рис. 1. Схема линейно-щелевого инжектора для сжигания газов в воде при раздельной подаче газов в воду.

1, 2 — медные цилиндры, 3 — щели, 4 — квазицилиндрический пузырь с горючей смесью (показан серым цветом), 5 — трубки для раздельной подачи газов.

искровой разряд. Разряд зажегся внутри пузыря 4 и инициировал горение. Зажигание смеси в пузыре осуществлялось программно с заданными интервалами времени от начала подачи газов.

Исследования гидродинамических процессов при отдельной подаче двух газов через щелевые инжекторы проводились в кювете из оргстекла размером 280×280×500 мм. Калориметрические исследования проводились в 5-литровой бутылке из поликарбоната. Скоростная регистрация горения газов и гидродинамических процессов осуществлялась при помощи камеры MotionXtra HG-LE. Время подачи газов через трубки 5 варьировалось в интервалах 3, 5, 8 мс. Время задержки зажигания смеси (t_{ign}) после подачи газов выбиралось из ряда значений 10, 15, 18, 20, 25, 30, 35, 40 мс по степени стабильности работы циклических режимов. За момент отсчета времени принимался момент открытия газовых клапанов. Выбирались различные соотношения горючего газа и кислорода при синхронном срабатывании клапанов. Были апробированы обедненные соотношения смесей водорода с кислородом и богатые соотношения смесей ацетилена и пропана с кислородом. Во всех случаях отклонение от стехиометрических составов было таким, что оно не влияло на эффективность воспламенения и работы системы в циклическом режиме. Все необходимые параметры, включая расход, цикличность подачи газов, искровых разрядов и время между ними, задавались при помощи автоматизированной системы многофункционального импульсного детонационного аппарата CCDS-2000, разработанного в ИГиЛ СО РАН [5].

На рис. 2 представлена принципиальная схема установки с функциями автоматизированной подачи газов в щелевое инжекционное устройство.

Данная постановка экспериментов и установка принципиально отличается от известных в литературе и использованных ранее в наших экспериментах. На этом макете была проведена первая серия гидродинамических и калориметрических исследований по иницированию и сжиганию ацетилена, водорода, пропана. Макетный образец отлажен в циклическом режиме работы с частотами до 2,5 Гц. Работу первого макета можно увидеть в режиме видео на сайте по адресу: http://www.swsl.newmail.ru/video/hydrogen_121101_1717.flv.html.

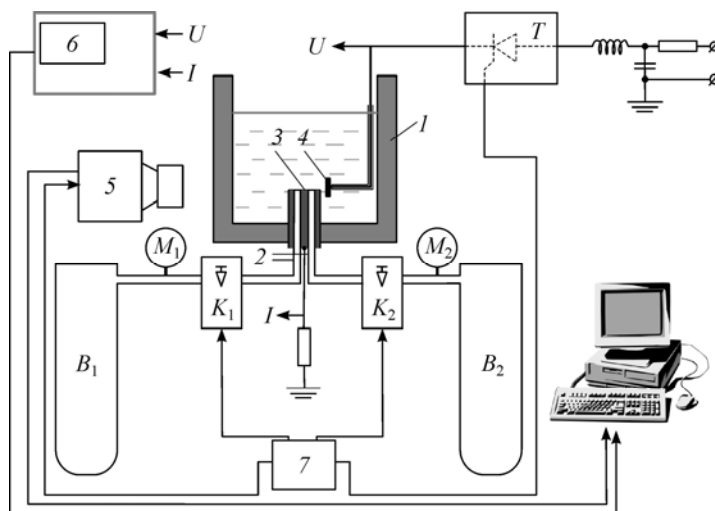


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки.

I — кювета из оргстекла или поликарбоната, 2 — подводные газопроводы, 3 — инжекционное устройство по сжиганию горючих газов в воде (см. рис. 1), 4 — электрод для иницирования горения газов, 5 — скоростная видеокамера, 6 — осциллограф, 7 — пульт управления, B — баллоны с газом, M — манометры, K — скоростные клапана подачи газа в воду, T — электронный коммутатор, U — напряжение, I — ток.

2. Постановка экспериментов с предварительно смешанными газами

Учитывая, что динамические режимы сжигания газов в воде были успешно реализованы [2], для более детальных исследований гидродинамических процессов при горении газов в воде были поставлены эксперименты по инициированию горения в пузырях с предварительно заготовленной смесью горючего газа с кислородом. Для этого пузыри со стехиометрической смесью пропана с кислородом объемом 1–4 см³ выдувались в воду и фиксировались на границе между водой и жесткой стенкой. Пузырь удерживался в горизонтальной плоскости в пазах на металлической стенке длиной 30–70 мм, что соответствует схеме рис. 1, если устройство перевернуть на 180°. Аналогичные постановки экспериментов были выполнены для кольцевых пазов диаметром 30–60 мм на торце металлического цилиндра. Инициирование горючей смеси в пузырях осуществлялось искровым разрядом с энергией до 4 Дж при напряжении до 1кВ. Проводилась скоростная киносъемка горения газа в пузырях и динамика расширения пузыря после сжигания газовой смеси. Съемка осуществлялась в двух проекциях.

Синхронно выполнялись измерения импульсов силы $F(t)$ на стенку, удерживающую пузырь. Регистрация импульсов силы на стенку осуществлялась на цифровом осциллографе TDS-210 с помощью динамометра на базе пьезокерамики из цирконаттитаната свинца (PbTiO₃) с диаметром 40 мм и высотой 15 мм, и эмиттерного повторителя с постоянной составляющей времени $\theta \approx 10$ сек.

3. Результаты экспериментов

3.1. Результаты для динамического смешения газов в воде

Киносъемка гидродинамических процессов выполнялась для двух проекций, вдоль щелей (по оси Z , рис. 1) и по нормали к щелевым инжекторам (по оси Y). На рис. 3 представлен пример теневой съемки, выполненной вдоль оси Z для процессов динамического смешения газов в воде, выдувания газов, зажигания и расширения квазицилиндрического пузыря.

Из рис. 3 наглядно видно, что процесс циклического сжигания газов в воде можно разделить на три основные стадии:

- инжекция газов в воду;
- инициирование и горение газа в пузыре;
- динамика расширения и пульсаций пузыря после сжигания газа.

Примечание. Все стадии имеют самостоятельные особенности, которые требуют системного изучения для задания необходимых режимов сжигания газов при разработке новых технологий в промышленности.

На рис. 4 представлены кадры киносъемки (5000 к/с) 2-й стадии первого цикла импульсно-циклического режима сжигания пропана, съемки проводились по нормали к щелевым инжекторам (по оси Y , рис. 1). Искровое инициирование горения осуществлялось в средней части щелевого инжектора. Из кинограмм следует, что у образуемого квазицилиндрического пузыря наблюдаются неустойчивости в виде “шероховатых” границ пузыря ($\delta \sim 1$ мм).

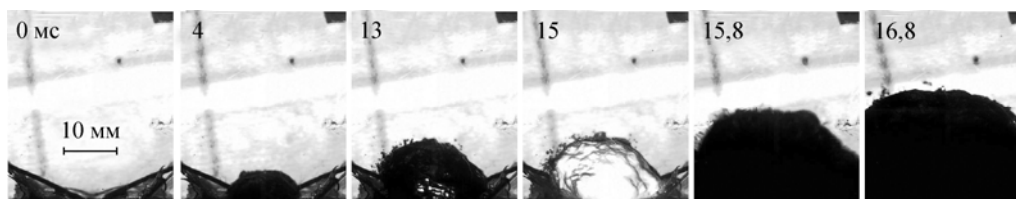
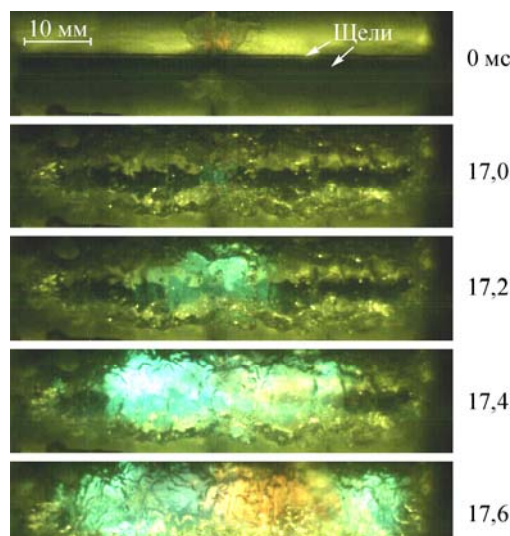


Рис. 3. Пример теневой кинограммы выдувания, зажигания и расширения квазицилиндрического пузыря длиной 70 мм. Съемка вдоль щелей.

Рис. 4. Кадры кинограммы 2-й стадии процесса: горение пропана в квазицилиндрическом пузыре. Скорость съемки 5000 к/с.



По результатам скоростных киносъемок гидродинамических процессов оценивалась скорость распространения фронтов свечения. Например, время инжекции в воду ацетилена с кислородом составляет 3 мс, момент инициирования осуществлялся при $t_{\text{ign}} \approx 15$ мс от начала цикла. Видимая скорость фронтов свечения была в интервале $u_f = 60\text{--}400$ м/с. Для пропана регистрируемая скорость фронтов свечения находилась в интервале $u_f = 60\text{--}160$ м/с. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в пузыре не возникали детонационные режимы сгорания ацетилена и пропана, а реализовывались нестационарные дефлаграционные процессы горения. Отметим, что скорость горения носила пульсирующий характер. Это же подтвердилось и в экспериментах с предварительно смешанными газами.

3.2. Циклическое сжигание газа в замкнутом резервуаре. Калориметрические исследования

Калориметрические исследования для оценки теплоотдачи от сгораемого газа воде для рассматриваемого линейно-щелевого макета, работающего в циклическом режиме с частотой 2,5 Гц, выполнялись в бутылки из поликарбоната в объеме воды три литра (http://www.swsl.newmail.ru/video/MVI_1779.flv.html). Стабильные режимы получены для инжекции газов в течение 5–8 мс при $t_{\text{ign}} = 15\text{--}18$ мс. Объемы инжектируемого горючего и окислителя за один цикл контролировались. Потери энергии за счет теплопроводности между бутылкой и воздухом не учитывались. Эксперименты проводились сериями от 500 до 1990 циклов. В расчетах удельной тепловой энергии q_n , переданной воде, учитывались все детали конструкции щелевого инжектора газов, вес деталей и их теплоемкость. Суммарная ошибка определения выделившейся в жидкости тепловой энергии находилась в пределах 20–37%. Ошибка расхода газов — 15%.

В таблице представлены результаты калориметрических измерений удельной тепловой энергии, переданной воде от сгораемого газа в циклическом режиме (q_n), для экспериментов со временем инжекции газов 8 мс и $t_{\text{ign}} = 15$ мс. Для представленных параметров обеспечивались устойчивые циклические режимы работы макетного образца с линейно-щелевым инжектором.

Из данных таблицы следует, что наибольшая эффективность теплоотдачи от сгораемого газа в воде получена при сжигании водорода. В экспериментах с водородом наблюдалось малое количество всплывающих пузырей, а при проведении экспериментов с ацетиленом и пропаном кювета интенсивно “кипела” от всплывающих больших пузырей.

Таблица

Результаты калориметрических измерений

Газ	Теплота сгорания (высшая) горючих газов [6], Дж/см ³	Объем инжектируемого горючего газа за один цикл, см ³	Объем инжектируемого кислорода за один цикл, см ³	Удельная тепловая энергия, переданная воде от сгораемого газа (q_n), Дж/см ³
Ацетилен	54,08	5,1	8	21
Водород	11,89	12,6	8	9,3
Пропан	92,29	3,55	10,44	21

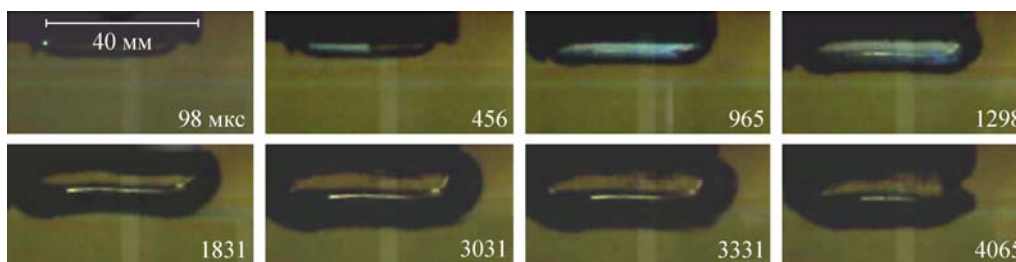


Рис. 5. Кадры скоростной съемки процесса горения и начала расширения квазицилиндрического пузыря.

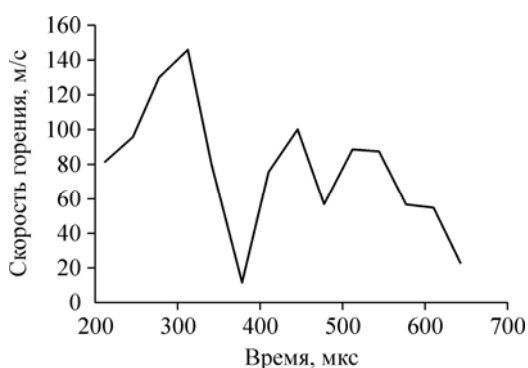
3.3 Результаты экспериментов для предварительно смешанных газов

На рис. 5 представлены кадры теневой кино съемки гидродинамических процессов при сжигании стехиометрической смеси пропана с кислородом в квазицилиндрическом пузыре объемом 2 см^3 . Пространственное разрешение регистрации гидродинамических процессов находилось в пределах $0,2 \text{ мм}$.

На рис. 6 представлена одна из диаграмм измерения скорости фронта свечения u_f для заранее приготовленной стехиометрической смеси $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$ в квазицилиндрическом пузыре. Из данных экспериментов следует, что при прочих равных условиях скорость горения пульсирует вдоль пузыря. От эксперимента к эксперименту для исследуемой смеси разброс значений скорости фронта свечения находился в пределах 160 м/сек . В целом пульсации скорости горения слабо влияют на динамику расширения пузырей.

На рис. 7 представлены кинокадры процесса горения смеси $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$ в кольцевом пузыре с осевым диаметром кольца 40 мм и объемом 3 см^3 , располагаемом на нижнем торце цилиндра диаметром 59 мм . На противоположном конце цилиндра устанавливался динамометр для измерения импульсов силы, генерируемых сжиганием газа в пузыре.

Особо отметим, что при горении газа в пузырях на стадиях уменьшения скорости фронта горения наблюдаются структуры фронта свечения в виде ласточкиного хвоста.



На рис. 5 это видно в момент времени $t = 965 \text{ мкс}$, на рис. 7 — при $t = 700 \text{ мкс}$. При этом фронт свечения на указанных стадиях процесса всегда голубой.

На рис. 8, а представлены отдельные кадры теневой кино съемки гидродинамических процессов при сжигании смеси $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$ в кольцевом пузырьке

Рис. 6. Пример одной из диаграмм пульсаций скорости фронта горения для смеси $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$ в квазицилиндрическом пузыре.

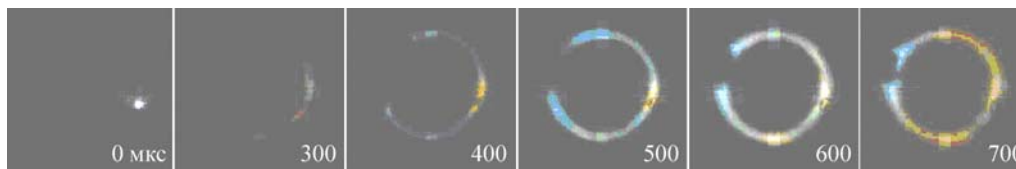


Рис. 7. Кадры скоростной съемки процесса горения пропан-кислородной смеси в кольцевом пузыре с осевым диаметром кольца 4 см . Объем газа 3 см^3 .

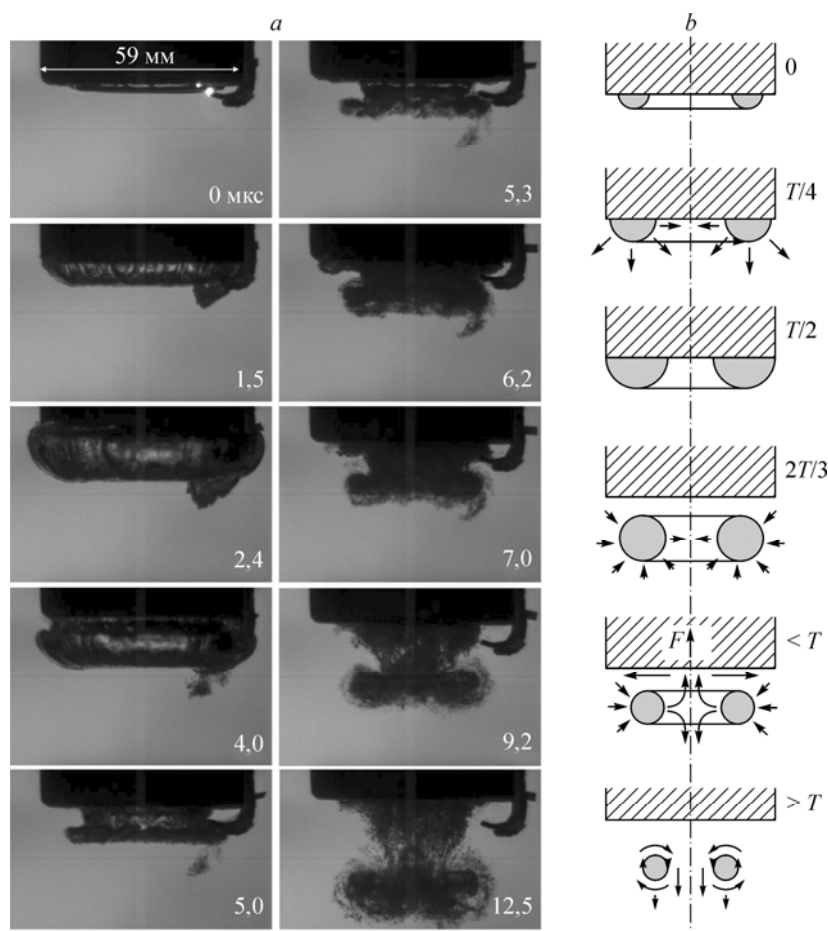


Рис. 8. Кадры теневой съемки (а) и соответствующая схематичная картина (б) гидродинамических процессов при сжигании газа в кольцевом пузыре с осевым диаметром $d = 40$ мм на торце цилиндра $D = 59$ мм. T — период пульсации торообразного пузыря, F — направление импульса силы.

с осевым диаметром 40 мм объемом 3 см^3 , располагаемом на торце цилиндра диаметром 59 мм. А на рис. 8, б представлена соответствующая схема гидродинамических процессов вблизи торца цилиндра, где T — период пульсации образованного пузыря.

Важным параметром в исследуемых процессах является начальный объем горючего газа, от которого зависит период пульсации пузыря и вся гидродинамика процесса. Так, для объемов газа $1\text{--}2 \text{ см}^3$ образуется торообразный пузырь, который коллапсирует радиально по диаметру тора и симметрично к оси кольца с образованием симметричных и противоположных потоков жидкости вдоль оси. При объемах газовой смеси более 2 см^3 торообразный пузырь превращается в эллипсоид, приплюснутый в направлении оси цилиндра. Такой пузырь коллапсирует радиально к оси кольца с формированием аксиальных потоков жидкости вдоль оси. На стадиях процесса, когда $t > T$, на кинограммах поток жидкости от стенки виден в виде струйного течения с образованием кольцевого вихря из мелких пузырьков. Струя, направленная в сторону стенки, косвенно отслеживается в виде растекания пелены пузырьков радиально вдоль торцевой стенки цилиндра. Дополнительным показателем действия импульсов от расширения и захлопывания пузыря является наблюдаемый процесс движения незакрепленного цилиндра вверх (рис. 8).

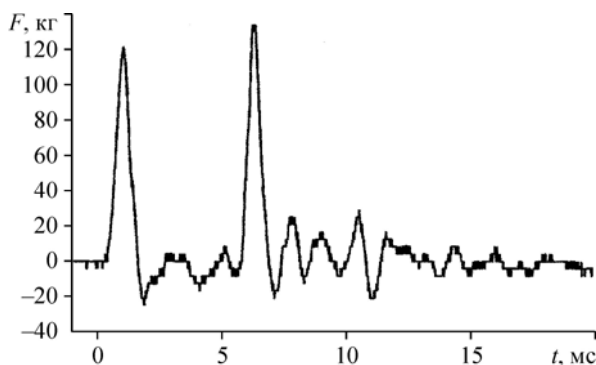


Рис. 9. Осциллограмма импульсов силы F от расширяющегося и захлопывающегося торообразного пузыря.

На рис. 9 представлена осциллограмма импульсов силы F при сжигании 2 см^3 стехиометрической смеси пропана с кислородом. На данной осциллограмме отслеживаются два основных импульса. Первый импульс (F_1) соответствует процессу расширения пузыря в результате сгорания газа, а второй импульс (F_2) соответствует моменту коллапса образованного пузыря и образованию гидропотока по нормали к тяговой стенке, который обеспечивает движение цилиндра. Видно, что второй импульс соизмерим с первым, при этом: $P_1 = \int F_1 dt = 0,077 \text{ кГ}\cdot\text{с}$, $P_2 = \int F_2 dt = 0,075 \text{ кГ}\cdot\text{с}$. Суммарный импульс за время 13 мс:

$$P = \int_0^{13 \text{ мс}} f dt = 0,13 \text{ кГ}\cdot\text{с}. \text{ В данном эксперименте вес пропана } m = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ кГ, в результате}$$

суммарный удельный импульс за один цикл сжигания $P_{\text{уд}} = P/m = 4,8 \cdot 10^4 \text{ с}$.

После первого коллапса тора или эллипсоидального пузыря ($t > T$) наблюдается дробление исходного пузыря с образованием вихря из более мелких пузырьков. Этот кольцевой вихрь из мелких пузырьков, перемещаясь вдоль оси цилиндра пульсирует с периодом 2 мс. Пульсации эти отслеживаются на кинограммах и на осциллограммах в виде слабых импульсов, которые возникают за счет сфазированных кооперативных процессов мелких пузырьков в вихревых кластерах.

4. Анализ экспериментальных результатов

Проведем анализ полученных результатов, исходя из введенного деления исследуемых процессов на три стадии.

1. Инжекция газов в воду.
2. Инициирование и горение газа в пузыре.
3. Гидродинамические процессы при пульсациях пузыря.

4.1. Инжекция газов в воду

Как оказалось, самыми сложными вопросами для постановки исследований по сжиганию газов в жидком теплоносителе явились задачи коалесценции пузырьков горючего и окислителя. Учитывая, что коалесценция пузырьков, выдуваемых из круглых отверстий, оказалась проблематичной, мы отказались от подобных схем и перешли к постановке выдувания газов через щелевые отверстия. Предполагалось, что границы выдуваемых квазицилиндрических пузырей являются изначально неустойчивыми, и эти неустойчивости должны способствовать надежной коалесценции двух пузырей и смешения газов. Коалесценция соприкасающихся газовых пузырей при встречном или касательном выдувании двух газов в воду может происходить за счет разрыва водяной пленки продольным или перпендикулярным потоком газа, а также за счет разрушения самих

пузырей при их движении относительно воды [2]. Экспериментально эти гипотезы подтвердились. Мы получили надежное инициирование и сжигание горючих смесей с частотой до 2,5 Гц. На кинограммах мы видим неустойчивости границы пузырей в виде “шероховатой” поверхности как до инициирования, так и в процессе горения газа, и при последующем расширении пузыря (рис. 3, 4). Изначальные неустойчивости границы пузыря в виде шероховатой поверхности предопределяют турбулентное горение газа в пузыре.

4.2. Горение газа в пузыре

Как для динамического смешения горючего газа с кислородом, так и для заранее приготовленной смеси в пузырях наблюдаются эффекты стохастичности процессов горения газов от эксперимента к эксперименту. Во всех экспериментах (ацетилен, водород, пропан) при динамическом смешении газов видимая скорость фронта горения не превышала 400 м/сек. Таким образом, мы имеем дело с дефлаграционным механизмом горения газов в пузыре. Можно предполагать, что шероховатая поверхность пузыря способствует развитию турбулентного горения [7]. Наблюдаемые пульсации продольной скорости фронта горения (рис. 6) связаны с неустойчивостью самого фронта горения, которые отслеживаются на кинограммах. Характерной особенностью наблюдаемых процессов является увеличение яркости синего цвета в ближней зоне фронта горения в периоды образования фронтов в виде ласточкиного хвоста. Это свидетельствует о возрастании температуры в зонах за фронтом горения.

Рассмотрим факт уменьшения продольной скорости горения вдоль пузыря в корреляции с наблюдениями фронтов свечения в виде ласточкиного хвоста (рис. 5, 7). Фронты свечения в виде ласточкиного хвоста возникают в моменты уменьшения продольной скорости фронта горения. При этом, как и для горения газов в металлических трубах [7], процессы горения вдоль оси пузыря могут тормозиться за счет увеличения поверхности фронта горения с появлением поперечной составляющей скорости фронта. Можно предполагать, что с увеличением скорости горения происходит увеличение паро-капельной фазы на границе фронта горения, которая работает как ингибитор. Это приводит к торможению фронта горения. Затем в областях, где паро-капельной фазы меньше, развиваются прорывные зоны горения, наблюдаемые на кинограммах в виде ласточкиного хвоста, что характерно для поперечных составляющих фронта горения. Так процесс горения ускоряется до следующего цикла торможения. И этот процесс может повторяться для определенных условий системы.

Если рассмотренная гипотеза окажется верной, то это означает, что в подобных системах возможно ограничивать процессы развития детонационных режимов горения и, следовательно, задавать необходимые режимы горения. Таким образом, можно создавать условия саморегулирования процессов горения газов без перехода в детонационный режим.

Отметим, что представленные результаты калориметрических исследований получены впервые и не оптимальны. Замечено, что в экспериментах с водородом (обедненная смесь) наблюдалось малое количество всплывающих пузырей, а в экспериментах с ацетиленом и пропаном (богатые смеси) кювета интенсивно “кипела” от всплывающих больших пузырей. Это свидетельствует о том, что кроме неполного сгорания значительная доля тепла при сжигании ацетилена и пропана улетучивалась. В этом недостаток первого линейно-щелевого макета. Эксперименты с кольцевыми пузырями (рис. 8) показали более эффективное дробление горячих пузырей с конвективными процессами в вихревых потоках уже более мелких пузырьков. Данные эксперименты указывают пути совершенствования подобных систем. При этом важным параметром оптимизации сжигания газов являются соотношения горючего и окислителя. На пути оптимизации рассматриваемого импульсно-циклического метода сжигания газов в жидкости можно

учитывать и результаты работ [8, 9], где исследовались режимы стационарного сжигания водорода в воде в зависимости от кислородного баланса. Например, с учетом этих работ понятна относительная эффективность сжигания водорода: при оптимизации кислородного баланса значительная доля продуктов сгорания конденсируется в воду, что и наблюдалось в экспериментах. Однако сравнивать результаты настоящей работы с результатами работ [8, 9] затруднительно, т.к. постановки и результаты работ принципиально различны.

4.3. Гидродинамические процессы. Импульсы силы

Наблюдаемая динамика гидродинамических процессов и струйных течений в жидкости при расширении и пульсациях пузыря вблизи жесткой стенки качественно подобна процессам течений, описанных в работе [10] для случаев пульсаций пузыря от взрывов конденсированных взрывчатых веществ вблизи свободной поверхности жидкости. Однако важно отметить следующее отличие от взрывов конденсированных взрывчатых веществ и взрывов газов в воде [11, 12]: в рассматриваемом 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 кинетической энергии от пузыря.

Из результатов синхронной регистрации гидродинамических процессов и измерений силы, действующей на торец цилиндра, следует, что первый импульс (рис. 9) соответствует процессу расширения пузыря, а второй импульс соответствует процессам развития аксиальной фокусировки потока жидкости, прилегающей к внутренней границе торообразного пузыря. При этом максимум скорости осевой струи в сторону торца цилиндра соответствует моментам времени периода первой пульсации торообразного пузыря. Моменты коллапса торообразного пузыря ($t = T$) соответствуют максимуму импульса силы на торец цилиндра. Эти результаты указывают на принципиальную возможность применения рассматриваемых методов при разработке импульсных подводных движителей. Отметим, что в случаях замыкания торообразного пузыря на оси тор превращается в сплюснутый эллипсоид, картина процесса сохраняется с тем отличием, что к оси фокусируется уже жидкость, прилегающая к внешнему периметру бывшего тора.

Выводы

1. Реализован импульсно-циклический метод сжигания углеводородов и водорода в воде с раздельной подачей в воду горючего газа и кислорода, который может быть использован при разработке новых технологий сжигания топлив для тепловых генераторов и подводных движителей.

2. 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.

3. С помощью рассмотренных методов сжигания газов на жесткой стенке можно исключить потери энергии в сложной цепочке существующих технологий преобразования химической энергии в механическую (ДВС, редуктор, винт) путем смены методов сжигания топлив для водных движителей, с непосредственным импульсным сжиганием газов в воде.

Список литературы

1. Тесленко В.С., Манжалеи В.И., Медведев Р.Н., Дрожжин А.П. Сжигание углеводородных топлив непосредственно в водном теплоносителе // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 4. С. 132–135.
2. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Манжалеи В.И., Медведев Р.Н., Ульяницкий В.Ю. Сжигание горючих газов в водном теплоносителе с раздельной подачей горючего и окислителя // Современная наука: сб. науч. статей. 2012. № 2(10). С. 64–67. http://www.swsl.newmail.ru/publ/teslenko_Alushta2012.pdf.
3. Платонов А.В. Подводные лодки. СПб.: Полигон, 2002. 256 с.
4. Новиков А.В., Ханталии Д.С., Богданов В.И. Пульсирующий гидрореактивный двигатель // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 5. С. 100–102.
5. Ulianitsky V., Shtertser A., Zlobin S., Smurov I. Computer-controlled detonation spraying: from process fundamentals toward advanced applications // J. Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20, No. 4. P. 791–801.
6. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств // Сб. «Национальные стандарты». М.: Стандартинформ, 2009. 88 с.
7. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 255 с.
8. Kumakura T., Hiraoka K., Ikame M., Kan S., Morishita T. Combustion characteristics of stoichiometric hydrogen and oxygen mixture in water // Inter. J. Hydrogen Energy. 1992. Vol. 17, No. 11. P. 887–894.
9. Kumakura T., Kan S., Hiraoka K., Ikame M. Characteristics of stoichiometric H₂-O₂ combustion in water with premixing and diffusion burners // Inter. J. Hydrogen Energy. 1996. Vol. 21, No. 8. P. 685–693.
10. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва, эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 434 с.
11. Коул Р. Подводные взрывы. М.: Изд-во иностранной литературы. 1950. 495 с.
12. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Фугасное действие взрывов. СПб.: Астерион, 2007. 250 с.

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2013 г.