

СРОЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 662.61+537.5

СЖИГАНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ
НЕПОСРЕДСТВЕННО В ВОДНОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

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

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, teslenko@hydro.nsc.ru

Показана принципиальная возможность сжигания углеводородных топлив непосредственно в водном теплоносителе. Представлены первые экспериментальные результаты на примере сжигания ацетилена в воде с иницированием зажигания газа в пузырьке электрическим разрядом, показывающие возможность перехода на новые принципы работы тепловых генераторов.

Ключевые слова: сжигание газов, углеводородные топлива, водный теплоноситель, электрический разряд, тепловой генератор.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема экономии энергии весьма актуальна в мире. Преимущественно рассматривается экономия энергии при ее потреблении. Однако наиболее важна экономия природных энергоресурсов на этапе производства тепловой и электрической энергии.

За последние годы технология получения электрической энергии и тепла при сжигании углеводородных топлив существенно не изменилась. В основном совершенствовалась технология передачи тепла теплоносителю путем улучшения характеристик теплообменных систем. Существующие теплообменники препятствуют увеличению удельных мощностей тепловых генераторов ввиду развития кризисных явлений при кипении жидкости [1]. Необходимы новые принципы и подходы для дальнейшего увеличения эффективности передачи тепла теплоносителю с существенным уменьшением выбросов вредных продуктов в биосферу. В настоящее время в промышленных тепловых генераторах сжигание углеводородных топлив осуществляется в режимах непрерывного горения с выбросом продуктов сгорания в атмосферу.

В данной работе рассматривается возможность передачи тепла от продуктов сгорания непосредственно водному теплоносителю в режиме импульсного сжигания горючих газов в пузырьках. Такой подход позволит снизить по-

тери тепла на стадии сжигания топлива и существенно уменьшить выбросы в атмосферу вредных продуктов сгорания. В работе экспериментально опробован метод зажигания ацетиленокислородных пузырьков электрическим разрядом в воде.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 представлена принципиальная схема постановки экспериментов. В кювете с водой размером $150 \times 150 \times 150$ мм (1) вертикально устанавливалась изолированная снаружи трубка-электрод (2), через которую в воду выдувался пузырек (3) со стехиометрической смесью ацетилена с кислородом. Для обеспечения электрического пробоя в пузырьке использовался (0.3 ÷ 0.6)%-й водный раствор поваренной соли. Зажигание газовой смеси в пузырьке осуществлялось подачей напряжения на трубку-электрод от конденсатора емкостью $C = 100$ мкФ с помощью электромагнитного ключа К. Конденсатор заряжался источником напряжения (5). В данных экспериментах индуктивность $L = 7.7$ мГн. Ток разряда контролировался на осциллографе Tektronix TDS-210 (6), подключенном к шунту $R = 0.2$ Ом. На втором луче осциллографа контролировалось напряжение U . Киносъемка гидродинамических процессов проводилась теневым методом при помощи скоростной видеокамеры MotionXtra HG-LE.

Опыты проведены со стехиометрической смесью ацетилена с кислородом ($C_2H_2 + 2.5O_2$). Газовая смесь выдувалась в воду

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 06-02-17453, 10-08-00788).

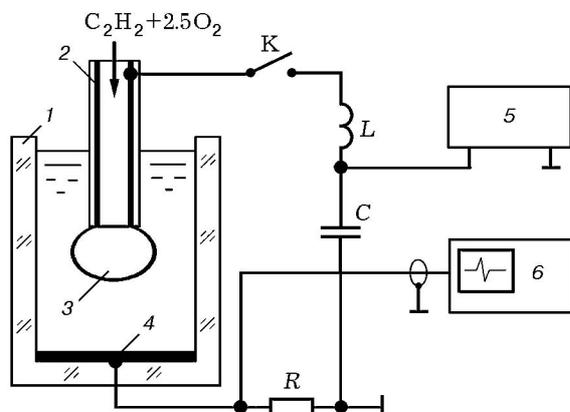


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — кювета из оргстекла, 2 — трубка-электрод, 3 — пузырек с ацетиленокислородной смесью, 4 — противоположный электрод, 5 — блок заряда конденсатора C , 6 — цифровой осциллограф, K — электромагнитный коммутатор, R — шунт Паркера, L — индуктивность

проводимостью $\approx 1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ через трубку-электрод внешнего диаметра $d_c = 2.1 \text{ мм}$, внутреннего — $d_{in} = 1.5 \text{ мм}$. При диаметре пузырька $d \approx d_c$ на электрод подавалось напряжение $350 \div 500 \text{ В}$. Для отсечения распространения пламени в систему газопровода в трубке устанавливался огнепреградитель.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Динамика расширения и пульсаций пузырька, в котором происходило сгорание газа, качественно подобна динамике пузыря при взрыве ВВ в воде. В наших экспериментах в результате сгорания ацетиленокислородной смеси в пузырьке его исходный диаметр d увеличивался до значения $D = (3 \pm 0.1)d$, с хорошей повторяемостью.

На рис. 2 представлены типичные кинограмма и осциллограммы процесса для одного цикла зажигания и сгорания газа в пузырьке начального диаметра $d = 2 \text{ мм}$ (а), а также два кадра (б) последующего дробления пузырьков. В данной постановке экспериментов электрический пробой в газе происходил внутри пузырька между трубкой-электродом и электролитом, что приводило к зажиганию газовой смеси в пузырьке. В представленных экспериментах энергия инициирования составляла $2 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$.

В данных условиях эксперимента пузырек расширяется до диаметра $D = 6 \text{ мм}$ за время 0.3 мс и затем начинает схлопываться

примерно до исходного размера, теряя симметричность. Схлопывание и последующее движение сопровождаются образованием вихревого торообразного пузырькового кластера. Скорость отрыва первого пузырькового кластера от электрода $v_b \approx 10 \div 15 \text{ м/с}$. В процессе движения торообразного пузырькового кластера происходит его дробление до размеров $d_i = 0.1 \div 0.3 \text{ мм}$. Через 10 мс область вдоль направления движения пузырькового кластера увеличивается примерно до 15 мм , что соответствует средней скорости потока воды, несущей малые пузыри, $v_w \approx 1.5 \text{ м/с}$. Из кинограмм следует, что в момент коллапса пузырька со сгоревшим газом (кадр 8) образуется второй пузырек. В данной постановке экспериментов второй пузырек генерируется энергией электрического разряда, это отслеживается на представленных осциллограммах в интервале времени $0.7 \div 1.2 \text{ мс}$.

На рис. 2, б частично представлена динамика последующего движения пузырьковых кластеров, образуемых от генерируемых пузырьков (на кадрах указано время от момента инициирования).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

По оценке, приведенной в [2], энергия точечного зажигания смеси $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$ при атмосферном давлении составляет $E \approx 10^{-6} \div 10^{-7} \text{ Дж}$. Пересчет на кольцевое ($d = 1.5 \text{ мм}$) зажигание дает минимальную энергию $E \approx 10^{-4} \div 10^{-5} \text{ Дж}$. В наших экспериментах по данным измерения тока и напряжения энергия зажигания составляла $2 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$. По-видимому, большая часть энергии тратится на нагрев и испарение электролита в зоне стыковки пузырька с наружной поверхностью трубки-электрода. Относительные затраты на зажигание пузырька составляли $2 \div 3 \%$ от выделившейся химической энергии. При увеличении размера исходного пузырька относительные затраты будут уменьшаться.

При сгорании газа по реакции $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 1318 \text{ кДж/моль}$ в пузырьке диаметром $d = 2 \text{ мм}$ выделяется энергия в количестве $Q = 0.94 \text{ Дж}$.

Был выполнен приближенный расчет времени сгорания газа в пузырьке в предположении, что перед и за фронтом сферического пламени температуры постоянны, а скорость пламени относительно газа равна 10 м/с . Учитывалось сжатие газа перед пламенем. Оказа-

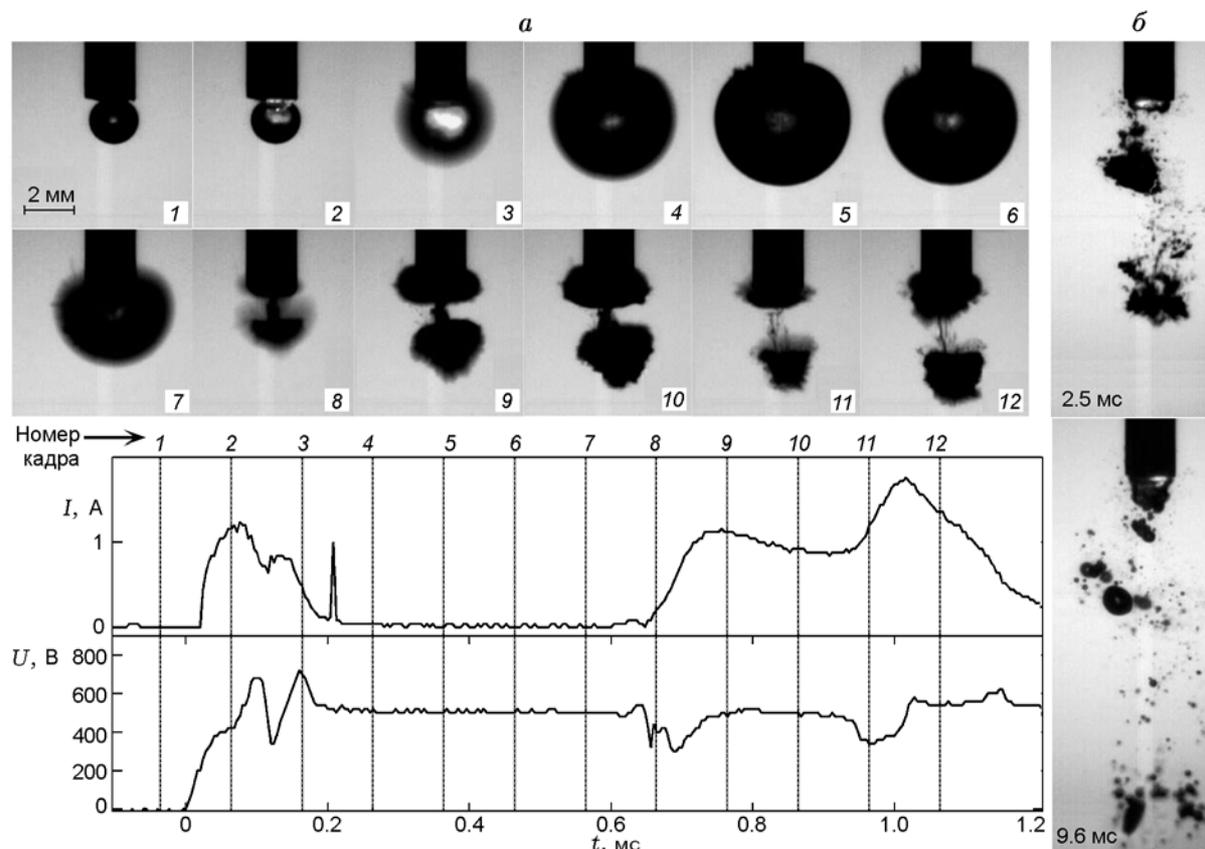


Рис. 2. Кинограмма одного цикла сжигания ацетиленокислородного пузырька в воде в корреляции с электрическими параметрами тока и напряжения (а). Последующее дробление пузырьков (б) (скорость съемки 10^4 кадр/с)

лось, что время сгорания газа в пузырьке около 13 мкс.

Оценка разгона стенки пузырька по закону сохранения энергии показала (в предположении линейной зависимости скорости от времени), что за время сгорания газа стенка разгоняется до 8 м/с, радиус увеличивается на 5 %, а объем — на 15 %. Примерно настолько же меньше должно быть максимальное давление в пузырьке по сравнению со сгоранием в постоянном объеме, так как расширение продуктов сгорания почти изотермическое. При этом давление возрастает только до ≈ 15 атм. Пузырек продолжает расширяться, а давление уменьшается. Максимальный размер пузыря можно оценить по работе газа при адиабатическом расширении. При эффективном показателе адиабаты 1.1 максимальный диаметр пузырька примерно в 3.9 раза больше начального диаметра, в то время как в экспериментах $D/d = 3$. Различие частично связано с тепло-

отдачей к воде в процессе расширения, а также с уходом части сгоревшего газа в подводящую трубку.

Возникает вопрос, насколько быстро тепло от сгоревшего газа в пузырьке передается воде. Если бы пузырек не разрушался, он остывал бы за время $t_1 \approx 10^{-2}$ с. В нашем случае раздробленные пузырьки отдают тепло за время $t_2 < 10^{-4}$ с. Степень дробления пузырьков можно оценить по числу Вебера. При относительной скорости ≈ 10 м/с число Вебера $We \approx 10^3$, что на два порядка превышает его критическое значение. При этом пузырек разрушается с диспергированием на более мелкие, со средним размером $d_i \approx 0.3$ мм. Именно дробление исходных пузырьков в нашей постановке приводит к резкому ускорению теплопередачи.

Киносъемка и осциллографические данные тока показывают, что рождение последующих пузырьков в результате разрядов на трубке-электроре с последующим пробоем в пу-

зырьках может происходить автоматически в моменты отрыва предыдущего пузырька.

Из этого следует, что одновременное зажигание газа в N пузырьках может реализоваться в режиме электрогидродинамической самосинхронизации пробоев в них [3, 4]. Электрические пробое с зажиганием газа в пузырьках будут происходить в момент перекрытия сечений электродов расширяющимися пузырьками.

Эта особенность указывает на перспективность разработок пульсирующих тепловых генераторов с предложенным принципом иницирования и сжигания углеводородных топлив. При этом верхний предел мощности генератора лимитируется только частотой подачи топлива в воду. Он определяется периодом пульсаций иницируемых пузырьков. Например, если частота сжигания рассматриваемых пузырьков 1 кГц и на площади 1 м^2 установлено 25 600 трубок-электродов, то средняя удельная мощность такого генератора составит $\approx 25 \text{ МВт/м}^2$. В этом случае предполагается, что дробление исходных пузырьков будет происходить независимо от соседних. Вся тепловая энергия остается в воде. Отметим, что эта оценка носит частный характер и соответствует условиям представленных экспериментов. Конструктивно возможны более мощные и компактные устройства с импульсным сжиганием топлив в водном теплоносителе. В подобных устройствах исключаются теплопередающие металлические элементы, которые препятствуют увеличению удельных мощностей ввиду развития кризисных явлений кипения в жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показана принципиальная возможность импульсного сжигания в автоматическом режиме углеводородных топлив непосредственно в водном теплоносителе для создания тепловых генераторов нового типа.

Авторы благодарны А. А. Васильеву за содействие в работе и С. А. Ждану за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. — Новосибирск: Наука, 1984.
2. Иванов В. А. Физика взрыва ацетилена. — М.: Химия, 1969.
3. Тесленко В. С., Медведев Р. Н., Дрожжин А. П. Самосинхронизация электрогидродинамических автоколебаний при многоочаговых разрядах в электролите // Письма в ЖТФ. — 2007. — Т. 33, вып. 19. — С. 55–63; <http://www.ioffe.ru/journals/pjtf/2007/19/p55-64.pdf>.
4. Medvedev R., Teslenko V., Drozhzhin A. Electrohydrodynamic self-synchronization of self-oscillations on two diaphragm current concentrators in electrolyte // Phys. Lett. A. — 2008. — V. 373. — P. 102–106; <http://www.swsl.newmail.ru/publ/PLA18400.pdf>.

Поступила в редакцию 21/VII 2009 г.