

УДК 536.71; 537.5; 662. 61

СЖИГАНИЕ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ В ВОДНОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ С РАЗДЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ГОРЮЧЕГО И ОКИСЛИТЕЛЯ

Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Манжалея В.И.,
Медведев Р.Н., Ульяницкий В. Ю.

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

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 10-08-00788.

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамических процессов, возникающих при сжигании горючих газов в воде вблизи жесткой стенки.

Экспериментально показана возможность сжигания газов в водном теплоносителе с раз-

дельной подачей в воду горючего газа и окислителя (кислорода).

Показана перспективность сжигания горючих газов в жидких теплоносителях на примере сжигания ацетилена, пропана и МАФ в воде.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] были рассмотрены новые подходы к проблемам создания энергосберегающих тепловых генераторов, основанных на идее сжигания газа непосредственно в жидком теплоносителе. При этом акцентируется внимание на принципиальной идее раздельной подачи горючего газа и окислителя в жидкий теплоноситель, что важно в перспективе для безопасной эксплуатации таких систем.

Раздельная подача газа требует обеспечить условия коалесценции выдуваемых пузырьков, что в некоторых случаях является сложной задачей. В данной работе эта задача была решена

путем выбора соответствующей геометрии подачи газов.

Как было показано ранее [2], для эффективной передачи тепла от горячих пузырьков в жидкость необходимо обеспечить их метание с высокой скоростью. Такое метание обеспечивается автоматически за счет расширения пузыря вблизи жесткой стенки [3,4]. В этом случае формируется пузырь, отлетающий от стенки, что обеспечивает конвективный теплообмен с последующим разрушением пузыря на микро пузырьки за счет высоких значений числа Вебера ($We > 10$).

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис.1 представлена схема постановки экспериментов.

В медных цилиндрах 1 и 2 были прорезаны щели 3. Длина щелей – 70 мм, а ширина ~ 0.2 мм. Из одной щели выдувался окислитель (кислород), а из другой – углеводородное топливо: ацетилен, пропан-бутановая смесь или метилацетилен-алленовая фракция (МАФ). Газы поступали к щелям через подводящие трубки 5.

Расход газов регулировался путём изменения площади поперечного сечения жиклёров, установленных в системе газоподводов. В процессе выдувания газов из щелей формировалось два раздельных “цилиндрических” пузыря. При дальнейшем выдувании газов происходил процесс их коалесценции с перемешиванием подаваемых газов и формирования единого пузыря 4 (на рисунке выделен серым цветом).

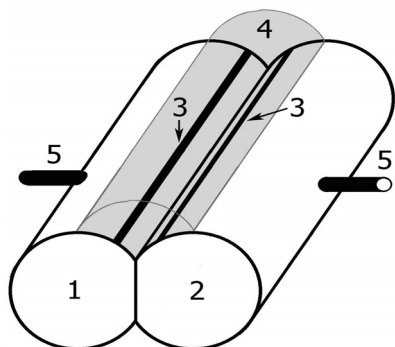


Рис.1 Схема экспериментальной установки для зажигания смеси при раздельной подачи газов в пузырь. 1, 2 – медные цилиндры; 3 – щели; 4 – ‘цилиндрический’ пузырь с горючей смесью (показан серым цветом); 5 – трубки для раздельной подачи газов.

На поверхности цилиндров 1 и 2 посередине располагались изолированные сбоку медные проволочки с направленными друг на друга остриями, между которыми генерировался высоковольтный искровой разряд. Зажигание смеси в пузыре 4 осуществлялось программно с заданными интервалами времени от начала подачи газов. Разряд зажигался внутри пузырька 4 и инициировал горение смеси.

Установка располагалась под водой на дне кюветы размером 280X280X500 мм. Скоростная регистрация гидродинамических процессов и процессов горения смеси осуществлялась при помощи камеры MotionXtra HG-LE (максимальная скорость съёмки – 50000 кадров/с). Время подачи газов через трубки 5 составляло 3 мс, а время задержки зажигания смеси выбиралось из ряда значений 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 40 мс. Все эти параметры, включая цикличность искровых разрядов и время между ними, задавались при помощи автоматизированной системы управления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В наших экспериментах средняя скорость потока в щелях составляла ~ 100 м/с.

На Рис.2 представлен пример теневой киносъёмки динамики зажигания и расширения квазицилиндрического ацетилен-кислородного пузыря, киносъёмка производилась вдоль щелей.

В опытах пламя в ацетилен-кислородной смеси распространялось в обе стороны от середины цилиндрического пузыря с приблизительно постоянной видимой скоростью ~ 200м/с.

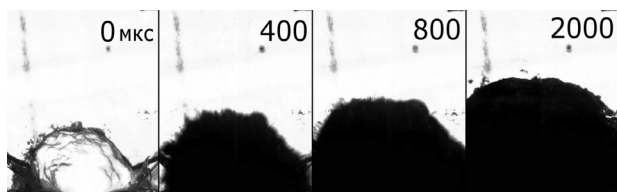


Рис.2 Теневая киносъёмка инициирования ацетилен-кислородного пузыря, вид с торца.

На Рис.3 показана зависимость радиуса сгоревшего пузырька от времени.

На Рис.4 представлены определенные по кинограммам скорости границы квазицилиндрического пузыря.

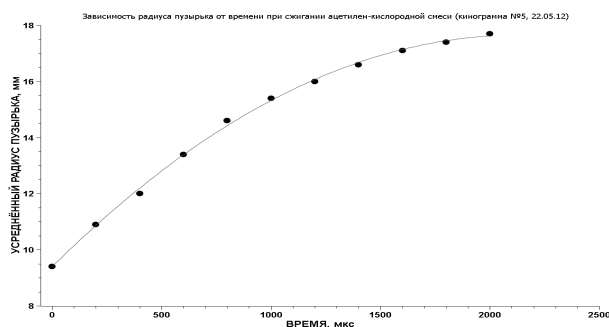


Рис.3 Зависимость радиуса пузырька от времени после инициирования горения.

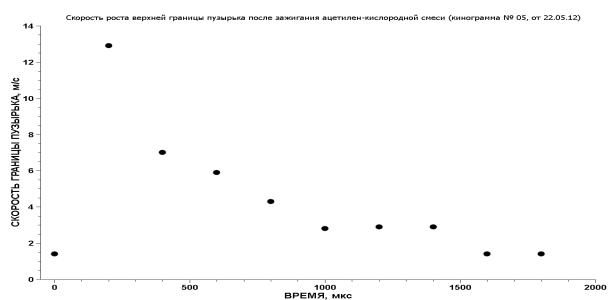


Рис.4 Зависимость скорости границы пузырька от времени после инициирования горения.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Самыми актуальными задачами для данной постановки сжигания газа в жидком теплоносителе являются вопросы начальной коалесценции пузырьков горючего и окислителя, кислорода или воздуха, и затем теплообмен и разрушение горячего пузыря в жидкости. Эти задачи в первом приближении рассмотрены в данной работе.

В начальной фазе видимая скорость пламени $U \cong \alpha V_n = 16 \cdot V_n$, т.е. сгоревший газ расширялся, как в трубе, открытой с холодного конца. Если горение остается ламинарным от начала до конца трубы, закрытой с обоих концов, то видимая скорость пламени проходит через максимум и к концу трубы уменьшается на порядок [5]. Поэтому полученная в экспериментах примерно одинаковая видимая средняя скорость распространения пламени на первой и на второй половине цилиндрического пузыря, заполненного взрывчатой смесью, означает, что скорость пламени V_n относительно газа перед ним в разы (4-6 раз) увеличивается со временем к концу трубы. Это означает, что пламя быстро становится турбулентным, по-видимому, в основном, за счет влияния сильно «шероховатых» стенок цилиндрического газового пузыря.

Шероховатости же на поверхности пузыря образуются за счет неустойчивости Релея-Тейлора. Радиус цилиндрического пузыря x связан со средней скоростью v истечения газа из щели ширины h и временем t :

$$\delta = \sqrt{2vht/\pi}.$$

$$\text{Скорость центра пузырька } u = \sqrt{\frac{vh}{2\pi}},$$

а ускорение $a = -\sqrt{\frac{vh}{16\pi^3}}$. Наибольшая скорость роста возмущений достигается при длине волны $\lambda_m = \sqrt{\frac{3\sigma}{\rho|a|}}$. При скорости истечения 100 м/с в наших экспериментах расчетная длина волны получается от 0,2 до 6 мм, такого же размера должны быть наиболее высокие шероховатости поверхности цилиндрического пузыря, что близко к тому, что наблюдалось в эксперименте.

Коалесценция соприкасающихся газовых пузырей при наполнении их газом может происходить за счет разрыва водяной пленки продольным или перпендикулярным потоком газа, а также за счет разрушения са-

мых пузырей при их движении относительно воды.

Оценим скорость потока газа, необходимую для коалесценции кислородного и ацетиленового пузырей из-за разрыва водяной пленки между ними. Снимки вдоль пузыря показывают, что он имеет форму, близкую к цилиндру. Так как расход ацетилена в 2,5 раза меньше расхода кислорода, то скорость истечения ацетилена также примерно в 2,5 раза меньше. Сектор пузыря, занимаемый ацетиленом, составит 50°. Это значит, что поток ацетилена натекает на водяную пленку, разделяющую газы, почти перпендикулярно и формирует в ней цилиндрический прогиб диаметром примерно равным ширине подводящего канала $h = 0,2$ мм. Этот прогиб будет неустойчив, и пленка, в конце концов, порвется, если сила давления торможения $\rho_g v^2 h/2$ (ρ_g – плотность газа) превысит силу поверхностного натяжения 2σ . В нашем случае критическая скорость

$$v \geq 2\sqrt{\sigma/h\rho_g} \cong 30 \text{ м/с}.$$

В разрыве пленки за счет газового потока могут также играть роль неустойчивости Релея-Тейлора ($\lambda_m \approx 10^{-4}$ м) и Кельвина-Гельмгольца ($\lambda_m \approx 10^{-5}$ м).

Рассмотрим коалесценцию пузырей при их столкновении с некоторой относительной скоростью. По-видимому, при этом водяные фрагменты движутся с обеих сторон к пленке, сильно ее деформируют, фактически пробивают и разрывают. В нашем случае, при выдувании двух одинаковых пузырей в очень близких точках жидкость отодвигается от плоскости симметрии. Можно показать, что наибольшее число Вебера пузыря получается в начале выдувания, когда диаметр пузыря примерно равен ширине выводящего канала. Тогда наименьшая скорость для разрушения пузыря

$$u^* = \sqrt{\frac{We^* \cdot \sigma}{\rho_l h}} \cong 0,6 \text{ м/с}.$$

(ρ_l – плотность жидкости), что соответствует приблизительно такой же скорости истечения газа из щели.

Средняя скорость потока в щелях ~ 100 м/с, поэтому ацетиленовые и кислородные пузырьки всегда коалесцировали.

ВЫВОДЫ

Экспериментально показана возможность сжигания газов в водном теплоносителе с раздельной подачей в воду горючего газа и окислителя, кислорода. На примере сжигания ацетилена, пропана и МАФ в воде показаны

возможности сжигания горючих газов для создания паро-газовых генераторов, исключая открытые топки и котлы, что позволит увеличивать эффективность энергетических установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С. Тесленко, В.И. Манжалей, Р.Н. Медведев, А.П. Дрожжин. Сжигание углеводородных топлив непосредственно в водном теплоносителе. // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 132-135, <http://www.swsl.newmail.ru/publ/fgv2010.pdf>
2. В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Р.Н. Медведев, В.И. Манжалей, В.Ю. Ульяницкий. Новые принципы создания тепловых генераторов на основе методов импульсного сжигания углеводородов непосредственно в водном теплоносителе. Сборник тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса "ЭНЕРГЕТИКА В ГЛОБАЛЬНОМ МИРЕ" (16–18 июня 2010 г. Россия, Красноярск), с. 85-86. http://www.swsl.newmail.ru/publ/tesl_tep1.pdf
3. В.С. Тесленко, Р.Н. Медведев, А.В. Зайковский. Автоколебательные явления в электролите на кольцевых концентраторах тока. Динамика сплошной среды, 2010, в. 126, с. 146-155, <http://www.swsl.newmail.ru/publ/DCM2010.pdf>
4. В.С. Тесленко, Р.Н. Медведев. Электрогидродинамические автоколебания в электролите на линейных и кольцевых концентраторах тока. // ПЖТФ, 2011, т. 37, в. 10, стр. 56-63, <http://journals.ioffe.ru/pjtf/2011/10/p56-63.pdf>,
5. Нестационарное распространение пламени. Ред. Маркштейн Дж. Г., Издательство «Мир». Москва, 1968, С.437.