

УДК 662.61

Черненко А.С., Шингарёв Г.Л., Иванов М.О., Калинин В.В., Конейка А.К.

Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова

E-mail: teplophys@onu.edu.ua

Определение скорости выгорания горючих жидкостей

В работе рассматривается предложенный авторами экспресс-метод экспериментального определения массовой скорости выгорания жидких горючих веществ. Описываются опыты, проводимые с различными жидкостями, которыми пропитывались изделия из пористого термостойкого материала в виде сфер или плоских цилиндрических «таблеток» разных диаметров. Эти изделия помещались на цифровые весы и поджигались. Видеокамера, состыкованная с компьютером, записывала показания весов и одновременно отслеживала процесс горения, фиксируя значение текущего времени t . При обработке видеофайла строилась зависимость массы выгорающей на образце жидкости от времени $M = f(t)$. На этом графике выделялся линейный участок для измерения скорости убыли массы, а по ней рассчитывалась удельная массовая скорость выгорания жидкости $\dot{m}$. Результаты сравнивались с данными, полученными другими исследователями в опытах по различным методикам определения $\dot{m}$: в частности, с методами "стационарной сферы", "подвешенной капли", выгорания в трубчатой горелке, а также с плоской свободной поверхностью.

Ключевые слова: пористая сфера, скорость горения, жидкость.

Введение. Применяемая в физике горения, теплотехнике и пожаровзрывобезопасности терминология «выгорание» соотносится с процессом горением веществ до их полного сгорания, т.е. естественного окончания горения (выгорания). Его количественными характеристиками являются величины скорости выгорания (СВ), как скорости убыли массы вещества dM/dt в ходе горения, а также удельная массовая скорость выгорания $\dot{m}$, определяемая отношением СВ к величине площади зоны горения S . Эти параметры необходимы для выяснения степени горючести веществ. Многочисленные эксперименты показывали, что скорость выгорания не всегда является постоянной в процессе горения [1]. Если на временной зависимости массы горящего топлива $M = f(t)$ имеется линейный участок, то скорость выгорания рассчитывается как тангенс угла наклона на этом участке $\Delta M/\Delta t$. В случае, когда такой участок трудно выделить, то на основании полученной кривой $M = f(t)$ строится временная зависимость удельной массовой скорости выгорания топлива $\dot{m} = \xi(t)$, на которой определяется максимум. Это наибольшее значение $\dot{m}$ может приниматься за основное значение удельной массовой скорости выгорания горючего вещества.

В настоящее время существует ряд расчётных и экспериментальных методик определения СВ, благодаря которым создана база данных значений $\dot{m}$ для различных твёрдых и жидких горючих.

В области пожаровзрывобезопасности для определения $\dot{m}$ жидких топлив распространены исследования горения в цилиндрических ёмкостях разных диаметров (для $d \approx 0.5 \div 1.5$ м в [2, 3]). Так в [4] определялись $\dot{m}$ и время полного выгорания п-гептана, а также дизельного топлива (солярного масла) в цилинд-

рических ёмкостях глубиной 10 см при различных диаметрах от 10 до 40 см, находящихся внутри некоторого замкнутого объёма. Значения $\dot{m}$ колебались в интервалах $8.2 \div 12.7$ г/(м²·с) для n-гептана и $8.3 \div 10.3$ г/(м²·с) для дизельного топлива. При таком кислородно-ограниченном режиме горения авторы использовали коэффициент расхода топлива η , отражающий степень расхода топлива на весь процесс горения: $\eta = \Delta m / M$, где Δm представляет собой массу топлива, израсходованного в процессе горения, а M – теоретическую массу топлива, которая может быть израсходована по количеству кислорода внутри герметизированного пространства. При диаметрах ёмкости более 15 см наблюдалось «кислородное голодание» при выгорании жидкого топлива. Коэффициент расхода n-гептана варьировался от 0.19 до 0.26, а дизельного топлива практически стабилен и составлял около 0.28.

В методике, указанной Баратовым А.Н. [5], массовую скорость $\dot{m}$ определяют по скорости выгорания горючей жидкости в цилиндрическом сосуде (горелке) диаметром 10 мм. Начальный уровень жидкости в горелке поддерживался постоянным на уровне 2.5 мм ниже верхнего края горелки за счёт сообщающихся сосудов. Питающий сосуд помещался на весы, чьи показания записывались во времени. За скорость выгорания жидкого топлива $\dot{m}$ принималась максимальная скорость $\dot{m}$ за 15 минут проведения эксперимента.

В описанных выше исследованиях горение жидкости происходило с плоской поверхности. Было замечено, что чем больше площадь поверхности, тем хуже реализуется принцип равнодоступности окислителя к любой части зоны горения и, как следствие, уменьшается скорость выгорания. Такая ситуация усложняет теоретическое описание процесса горения жидкости с больших поверхностей. Исследования процесса горения жидкости на сфере в этом плане являются альтернативными «плоскому» варианту.

Известен ряд классических методов [6] изучения процесса горения капель жидкого топлива: 1) метод пористой сферы (стационарной капли), 2) падающей капли и 3) подвешенной капли. Особенностью двух последних методов является изменение размера капли в ходе горения и, соответственно, изменение (уменьшение) поверхности капли. В данном случае характеристикой процесса является константа горения K_{bur} (выражаемая в единицах м²/с). Этого недостатка лишён метод пористой сферы (стационарной капли), однако, для его реализации необходимо постоянно подводить горючую жидкость через определённый канал внутрь пористой сферы. При этом массовая скорость выгорания $\dot{m}$ определяется массовой скоростью подачи топлива.

Целью настоящей работы является ознакомление с разработанным авторами экспериментальным экспресс-методом определения массовой скорости выгорания жидких горючих. А также оценка характеристик этого метода при сопоставлении полученных экспериментальных данных с подобными результатами, измеренными в опытах других исследователей.

Экспресс-метод реализуется экспериментальной установкой, описанной ниже, схема которой показана на рис.1.

Объектами исследования были выбраны следующие жидкие горючие вещества: эталонные химически чистые гептан и октан; распространенные

Таблица 1. Параметры исследуемых жидкостей [7]

Параметры ↓ Вещества →	Гептан	Этанол	Ацетон	Октан	ДТ	ПТ	М100
Плотность ρ (20 °С), кг/м ³	684	789	784	703	820÷845	920	1015
Молярная масса μ_f , г/моль	100	46	58	114	110÷230		
Температура кипения T_b , °С	98.4	78.3	56.3	125.5	280÷360		> 430
Удельная теплота сгорания Q , МДж/кг	4.5	30.0	31.4	48.0	39.2÷42.7	45.4	40.0
Удельная теплота испарения L при $T_{\text{кип}}$, кДж/кг	316	836	513	300	230÷250		1968

жидкости этанол (96%) и технический ацетон, а также широко используемые жидкие горючие → мазут марки М100, дизельное топливо (ДТ) и пиролизное топливо (ПТ), полученное из автомобильных покрышек (см. табл. 1).

Экспериментальная установка схематически представлена на рис. 1 вариантами а) и б) для реализации весового метода определения скорости выгорания горючих жидкостей: а) – с плоской пористой поверхности (цилиндрическая таблетка); б) – с пористой сферы (стационарная капля). А также вариантом с) – поршневой модификации подачи горючего в стационарную каплю.

В вариантах а) и б) используются цифровые весы (1) с максимально измеряемым весом – 50 г и точностью 1 мг. Веб-камера (7) установлена так, чтобы её поле зрения охватывало дисплей весов (2) для записи текущего веса объекта и сам объект (4 или 5) с факелом (см. рис. 3 → горящие цилиндрические таблетки и пористые сферы). Для того чтобы уменьшить засветку веб-камеры факелом горящего образца используется экран (3) из нейтрального светофильтра. Вариант экспериментальной установки с) будет описан ниже.

Отличительной особенностью предложенного экспресс-метода от существующих методов определения скорости выгорания жидких горючих, является значительное снижение рутинности самого процесса измерения (сокращение времени для подготовки и проведения опыта), а также необходимость иметь

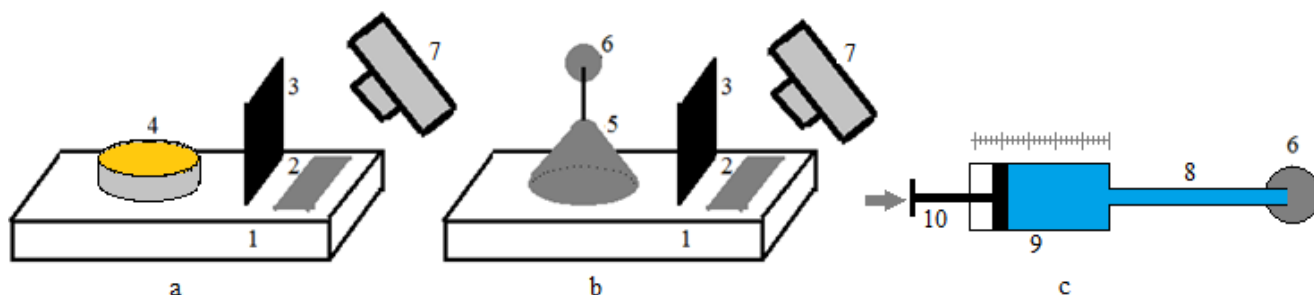


Рис. 1. Экспериментальные установки для определения скорости выгорания жидких горючих: вариант а) – выгорание жидкости с плоской поверхности (цилиндрическая таблетка из пористого огнеупорного порошка); вариант б) – пористая сфера; вариант с) – метод подачи горючего в стационарную сферу посредством поршня.

1 – цифровые весы, 2 – дисплей весов, 3 – световой экран, 4 – цилиндрическая ёмкость с керамическим порошком, 5 – подставка для сферы, 6 – сфера из пористого огнеупорного материала, 7 – веб-камера, 8 – игла, 9 – ёмкость с горючей жидкостью, 10 – поршень, движущийся с регулируемой постоянной скоростью.

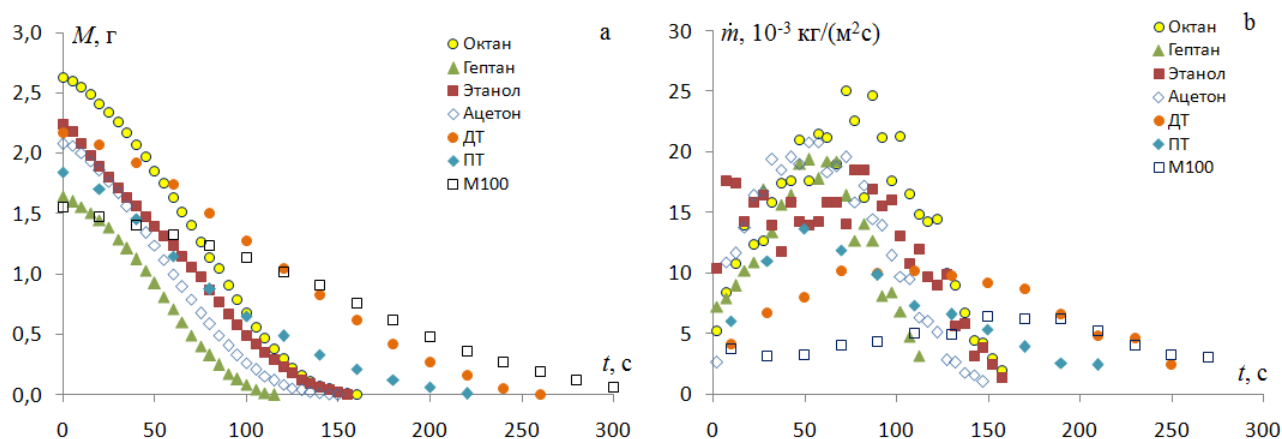


Рис. 2. Временные зависимости процесса выгорания различных жидкостей на плоской пористой поверхности цилиндрической кюветы: а) массы горящей жидкости $M = f(t)$; б) удельной массовой скорости выгорания $\dot{m} = \xi(t)$. Горючие жидкости: $\diamond$ – ацетон, $\blacksquare$ – этанол, $\blacktriangle$ – гептан, $\circ$ – октан, $\bullet$ – ДТ (дизельное топливо), $\blacklozenge$ – ПТ (пиролитическое топливо), $\square$ – М100 (мазут марки 100). Диаметр кюветы $d = 38$ мм, площадь $S = 1134 \text{ мм}^2$. Среда сжигания: воздух при комнатной температуре.

метрологически обеспеченное специализированное оборудование. Ведь основной элемент в предложенном методе – электронные весы, которые всегда реализуются предприятиями-изготовителями метрологически обеспеченными. Сам же процесс дальнейшей периодической поверки весов прост и может быть проведен самим пользователем при наличии эталонных стандартных грузов (обычно входящих в комплект весов).

Измерения в самом простом варианте опытной установки (весы без системы связи с компьютером) проводились с использованием следующего алгоритма. При просмотре видеозаписи процесса выгорания на компьютере сопоставлялись показания весов с соответствующими значениями времени, отмечаемыми компьютером на видеофайле. Затем при помощи стандартной программы обработки данных строился график скорости горения жидкости $M = f(t)$, а из него строилась временная зависимость удельной массовой скорости выгорания $\dot{m} = \xi(t)$ (см. рис. 2а и 2б). Анализ этих графиков по способу, описанному выше, даёт искомые величины.

Преимущество такого метода отражает не только его название – экспресс, но и возможность самостоятельно создать опытную установку без использования специального инструмента и технологического навыка экспериментатора (лаборанта). Как было показано в обзорной части статьи (см. Введение), в существующих методиках процесс выгорания организовывался так, чтобы можно было выделить на временной зависимости $M = f(t)$ линейный участок, по которому рассчитывалась скорость выгорания $\dot{m}$. Для минимизации влияния переходных процессов (имеющих место в начальной и конечной стадиях горения) ранее использовалась непрерывная подача жидкости к зоне горения (к горелкам) с системой измерения и стабилизации расхода жидкости. Применение в предложенном методе огнеупорных пористых веществ для пропитки их исследуемыми горючими жидкостями и динамическим замером массы выгорающей

жидкости позволяет отказаться от таких сложностей. Покадровое отслеживание процесса горения с дискретностью 1/5 секунды даёт возможность определить линейный участок за короткое время горения, т.е. при использовании небольшой массы жидкости (несколько грамм). Практика показала, что на проведение одного замера параметра горючести жидкости (+ обработка данных) необходимо $\sim 10 \div 15$ минут.

В опытах по новой методике проводились исследования, связанные с сопоставлением процессов выгорания различных горючих жидкостей (см. табл. 1) с плоской пористой поверхности (рис. 1а и 3аb) и сферической поверхности (рис. 1b и 3c,d). В варианте 1а применялись цилиндрические кюветы разных диаметров, изготовленные из алюминиевой фольги, в которые насыпался и уплотнялся порошок, изготовленный из стандартного огнеупорного кирпича марки ША плотностью 500 кг/м^3 . Куски кирпича растирались в ступе и просеивались в сите с размером ячеек 0.8 мм. Кювета (цилиндрическая «таблетка») устанавливалась на электронные весы, имеющие на своей рабочей поверхности теплоизоляционную подложку, а затем на шамотный порошок пипеткой накапывалась горючая жидкость. Например, в цилиндрическую кювету с внутренним диаметром $d = 38$ мм и высотой бортика $h_6 \approx 7$ мм вливалось около 2 г исследуемой жидкости. При включённом компьютере (с работающей программой обработки видео-файлов), веб-камере и весах шамотный порошок, пропитанный горючей жидкостью, поджигался газовой горелкой. После выгорания жидкости видео-файл, фиксирующий процесс горения, обрабатывался по формуле (1), представленной ниже.

Вторым этапом опытов стало определение скорости выгорания с пористых сфер разных диаметров (см. рис. 1b). Сферы изготавливались из стандартного огнеупорного кирпича марки ША (плотностью 500 кг/м^3) методом кругового вырезания трубчатыми свёрлами (либо пробойниками для прокладок). Возможен вариант изготовления сфер из стандартного шамотного порошка методом лепки глиняных шариков, их обжига в муфельной печи и последующего ошкуривания до открытия пор.

Для установки сфер на весах была изготовлена конусная подставка из того же огнеупорного кирпича, в вершине которой находилось отверстие, ориентированное вдоль высоты конуса. В это отверстие вставляется упругая проволока, другой конец которой вставляется в отверстие в нижней части пористой сферы. Конус из огнеупора также блокирует тепло, идущее к весам при горении пористой сферы. Вся конструкция помещалась на электронные весы. Для смачивания горючей жидкостью сфера опускалась в небольшую ёмкость с этой жидкостью и выдерживалась в ней $5 \div 10$ с, чтобы горючее основательно впиталось в поры. Вся конструкция ставилась на весы, затем сфера поджигалась газовой горелкой. Процедура записи процесса видеокamerой описана выше.

Результаты измерений. На рис. 2а и 2b представлены временные зависимости выгорания массы различных горючих жидкости $M = f(t)$ в цилиндрической кювете с шамотным порошком (в цилиндрической «таблетке») и рассчитанной из рис. 2а удельной массовой скорости выгорания $\dot{m} = \xi(t)$ этих жидко-

стей. Разность между текущим показанием весов M_i и предыдущим показанием M_{i-1} есть масса сгоревшего топлива (находящегося в огнеупорном порошке) за наблюдаемый интервал времени. Как указывалось ранее, покадровое отслеживание процесса горения происходит с дискретностью в 1/5 секунды. В наших опытах показания весов снимались для построения графиков через 5 секунд при горении ацетона, этанола, гептана, октана и через 20 секунд для «медленно горящих топлив» – мазута М100, ДТ, ПТ. Удельная массовая скорость выгорания $\dot{m}$ определялась на каждом временном участке (от t_{i-1} до t_i) как:

$$\dot{m} = (M_{i-1} - M_i) / S(t_{i-1} - t_i), \quad (1)$$

где $S = \pi d^2/4$ – площадь горения для плоского случая, $S = \pi d^2$ – для сферы.

Из рис. 2а видно, что при горении цилиндрической «таблетки» имеет место такой временной интервал, где масса горючего уменьшается практически линейно, что говорит о наличии участка с квазипостоянной скоростью горения. Например, для ДТ (дизельного топлива) этот участок имеет протяжённость от 50 до 170 секунд от начала горения (рис. 2а).

На кривых изменения удельной массовой скорости выгорания со временем $\dot{m} = \xi(t)$ (рис. 2б) видны максимумы, соответствующие точкам перегиба на временных кривых $M = f(t)$ (рис. 2а). За исключением октана, удельная массовая скорость выгорания $\dot{m}$ всех исследуемых жидкостей на достаточно широком временном интервале не отличается от максимального значения на $\approx 25\%$. Это позволяет в качестве найденной величины $\dot{m}$ использовать её среднее значение вблизи точки перегиба кривой $M = f(t)$ (рис. 2а). Однако предпочтительней использовать максимальное значение $\dot{m}_{\max}$ из рис. 2б, как более удобный вариант компьютерной обработки опытных данных. Например, из кривой $\dot{m} = \xi(t)$ для дизельного топлива (ДТ) легко определяется $\dot{m}_{\max} = 10^{-3}$ кг/(м²·с). Этому максимуму соответствует $t \approx 120$ сек.

Во всех случаях наблюдается временной участок прогрева горючей жидкости до установления квазистационарного режима горения.

На рис. 3 представлен внешний вид горящих пористых поверхностей, смоченных горючей жидкостью: а) цилиндрических таблеток и б) сфер. В процессе горения согласно теоретическим представлениям [6, 8] на поверхности сферы температура близка к температуре кипения топлива.

На рис. 4 представлены временные зависимости массы выгорающей жидкости на смоченной пористой сфере диаметром 11.5 мм. Качественно графики имеют вид, представленный в [1], причём у всех их наблюдался участок с линейным законом уменьшения массы горящей жидкости со временем. В самом общем случае зависимость $M = f(t)$ (рис. 4а) можно разделить на три участка. При поджоге газовой горелкой сферы, пропитанной топливом, из-за её нагрева и разнородности пламени на фронтальной и тыльной частях сферы, наблюдается нарастание скорости горения до установления квазистационарного режима. Исходя из рис. 4а, этот первый этап занимает до 5 секунд.

Второй этап – стадия квазистационарного горения. Как и при горении на плоской поверхности (рис. 2б), наблюдается возникновение максимума на временной зависимости удельной массовой скорости выгорания $\dot{m}$ (рис. 4б). Одна-

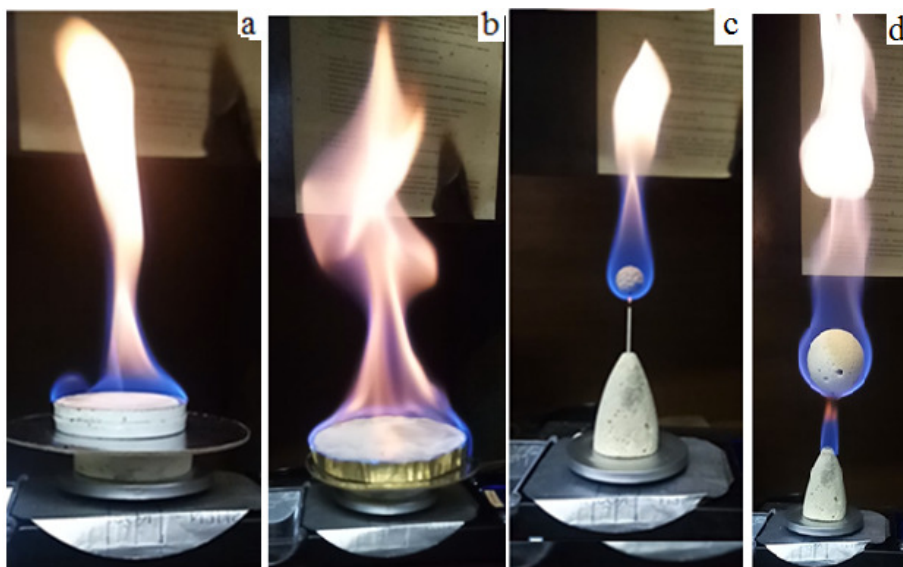


Рис. 3. Внешний вид горящих пористых поверхностей, смоченных горючей жидкостью (этанолом): а, б) – цилиндрических таблеток диаметром 40 и 60 мм и с, д) – сфер диаметром 11.5 и 35 мм.

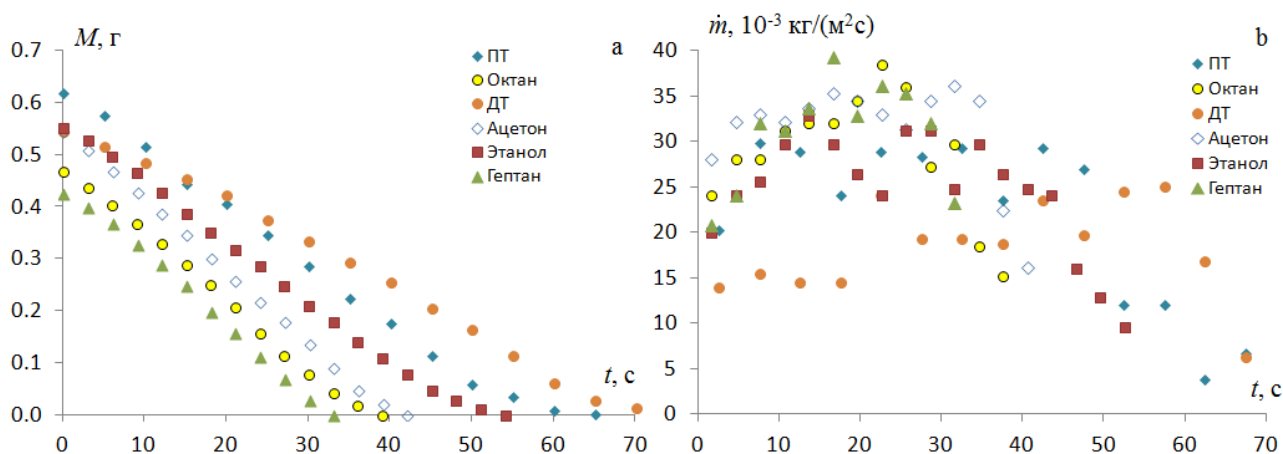


Рис. 4. Временные зависимости процесса выгорания различных жидкостей на пористой сфере. а): массы горящей жидкости $M = f(t)$. б): удельной массовой скорости выгорания $\dot{m} = \xi(t)$. Горючие жидкости: $\diamond$ – ацетон, $\blacksquare$ – этанол, $\blacktriangle$ – гептан, $\circ$ – октан, $\bullet$ – ДТ (дизельное топливо), $\blacklozenge$ – ПТ (пиролизное топливо). Диаметр сферы $d = 11.5$ мм, площадь $S = 415$ мм². Среда сжигания: воздух при комнатной температуре.

ко при горении на пористой сфере временная зона максимума более широкая относительно общего времени горения.

При приближении процесса выгорания к окончанию, жидкость на сфере перестает покрывать всю её поверхность (третий этап – угасание). Кривая удельной массовой скорости выгорания $\dot{m} = \xi(t)$ начинает приближаться к нулевому значению. Для различных жидкостей временной диапазон выгорания разный – от ≈ 30 до 70 секунд (см. рис. 4а).

В табл. 2 представлены результаты по удельной массовой скорости выгорания $\dot{m}$ для линейного участка длительностью $\tau_{\text{лин}}$:

$$\dot{m} = \dot{M} / S, \quad \dot{M} = \Delta M_{\text{лин}} / \tau_{\text{лин}}, \quad (2)$$

Таблица 2а. Экспериментальные значения удельной массовой скорости выгорания $\dot{m}$ [10^{-3} кг/(м²·с)] и константы горения K_{bur} [10^{-6} м²/с]

Метод ↓ $\dot{m}$ для следующих горючих →	Гептан	Этанол	Ацетон	Октан	ДТ	ПТ
Плоская поверхность по [5] $d = 10$ мм	89.7	37.0	59.6	78.9		
Плоские поверхности с диаметрами $d = 0.5 \div 1.5$ м	81 [8] 72 [3] 101 [1]	20 [8] 23 [3], 15 [1]	38 [8] 52 [3], 41 [1]	81 [8]	54 [8] 55 [1]	
Плоская пористая поверхность $d = 38$ мм	17.7	13.9	19.2	20.7	11.4	12.3
Плоская жидкая поверхность $d = 38$ мм	17.2	13.7	19.1	40.6	10.0	11.9
Пористая сфера $d = 11.5$ мм	35.0	28.0	33.5	33.2	21.2	29.0
"Стационарная капля" $d = 8$ мм	54.4	39.0	55.7	60.8	41.8	
Пересчёт по формуле (4) для «капли» $d = 11.5$ мм	14.4	13.9	19.8	14.5	14.4	
K_{bur} для «подвешенной капли» по [10]	0.967	0.810	1.160	0.949	0.791	

Таблица 2б. Отношение значений удельной массовой скорости выгорания жидкостей, используемых в эксперименте $\dot{m}_{uc}$, а также константы горения K_{bur} к соответствующим значениям $\dot{m}_o$ для этанола $\Omega = \dot{m}_{uc} / \dot{m}_o$

Метод ↓ Ω для следующих горючих →	Гептан	Этанол	Ацетон	Октан	ДТ	ПТ
Плоская поверхность $d = 10$ мм по [5]	2.42	1	1.61	2.13		
Плоские поверхности с $d = 0.5 \div 1.5$ м по [8]	4.05	1	1.90	4.05	2.70	
Плоская пористая поверхность $d = 38$ мм	1.27	1	1.38	1.49	0.82	0.88
Плоская жидкая поверхность $d = 38$ мм	1.25	1	1.39	2.96	0.73	0.87
Пористая сфера $d = 11.5$ мм	1.25	1	1.20	1.19	0.76	1.04
"Стационарная капля" $d = 8$ мм	1.39	1	1.43	1.56	1.07	
Пересчёт по формуле (4) для «капли» $d = 11.5$ мм	1.04	1	1.43	1.04	1.03	
K_{bur} для "подвешенной капли" по [10]	1.19	1	1.42	1.17	0.98	

Как указывалось ранее, весовые измерения фиксируются 5 раз в секунду. Поэтому при снятии их показаний видеокамерой и построении графиков $M = f(t)$ и $\dot{m} = \xi(t)$ с дискретностью 5 или 20 секунд наблюдаются «скачки» узловых значений величин. На графике $M = f(t)$ они несут существенны (рис. 2а и 4а), так как на прямолинейном участке для расчётов $\dot{M}$ по (2) осуществляется сглаживание кривой. Однако, при построении графика $\dot{m} = \xi(t)$, исходя из расчётов по (1), происходит визуальное «усиление» разброса точек (см. рис. 2б и 4б).

Для каждой жидкости проводились по три опыта, полученные данные усреднялись. Отклонение от среднего арифметического достигало $\Delta \dot{m} = \pm 0.5 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с).

Из таблиц 2 при сопоставлении позиций «Плоская пористая поверхность» и «Плоская жидкая поверхность» видно, что наличие шамотного порошка в цилиндрической кювете практически не влияло на значения удельной массовой скорости выгорания $\dot{m}$ в рамках погрешности измерений.

Для сравнения рассматриваемого метода нахождения $\dot{m}$ жидких топлив при выгорании с пористых поверхностей, авторами был использован метод «стационарной капли» (см. рис. 1с) [11]. Изготовленная из металлической проволоки (плотностью 2900 кг/м^3) сфера диаметром 0.8 см (площадь внешней поверхности 2.01 см^2), подвешивалась на медицинской игле, через которую с постоянной скоростью продавливалась горючая жидкость при помощи поршня. Скорость движения поршня подбиралась такой, при которой наблюдалось устойчивое горение жидкости на поверхности сферы без отрыва капель. Тогда удельная массовая скорость выгорания топлива определялась как:

$$\dot{m} = \rho V_s / S_0 \tau_s \quad (3)$$

Здесь V_s – объём горючего, который проталкивается поршнем за время τ_s , S_0 – площадь внешней поверхности «стационарной сферы».

При горении свободно падающей или подвешенной капли наблюдается линейный закон изменения квадрата её диаметра со временем. Коэффициент пропорциональности называют константой горения K_{bur} [9]. Хотя размер подвешенной капли и ограничен, предположим, что её можно использовать и для более крупных капель. Поэтому пока на поверхности «пористой сферы» есть горючая жидкость можно принимать её за большую каплю. Тогда удельная массовая скорость выгорания:

$$\dot{m} = \rho K_{bur} / 4d, \quad (4)$$

где d – диаметр капли (сферы), для которой рассчитывается $\dot{m}$, ρ – плотность горючей жидкости.

Анализ данных из табл. 2 позволяет утверждать, что значение удельной массовой скорости выгорания $\dot{m}$ зависит от метода её измерения, в частности от размера и формы поверхности испарения, а также пористости материала сферы.

В [12] авторы указывают на то, что величина скорости горения жидкости непостоянная и изменяется в зависимости от начальной температуры, диаметра резервуара, уровня жидкости в резервуаре и других факторов. Согласно теории горения [6, 9] эти факторы входят в аналитическое выражение для $\dot{m}$:

$$\dot{m} = \frac{\lambda}{c_p d} Nu \ln \left(1 + \frac{c_p}{L} \left(T_g + \frac{1}{Le} (T_{bur} - T_g) - T_s \right) \right), \quad (5)$$

где температуры T_{bur} – горения, T_g – окружающего воздуха, T_s – поверхности горючей жидкости, L – удельная теплота парообразования, c_p – удельная теплоёмкость паров, λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Nu и Le – числа Нуссельта и Льюиса.

Этанол, у которого высокая теплота парообразования (см. табл. 1), разделяет имеющие объекты исследования на две группы (рис. 2) – с высокой удельной скоростью выгорания (гептан, ацетон, октан) и низкой (ДТ, ПТ, М100).

Представляет интерес рассмотрение полученных данных (табл. 2а) в величинах отношений $\Omega = \dot{m}_{uc} / \dot{m}_3$ для различных горючих (табл. 2б), приведенных к

характерному горючему (этанолу). Несмотря на то, что по разным методикам получены различные значения $\dot{m}_{ис}$ (согласуются только данные [5] и данные "стационарной капли"), наблюдается интересная особенность: величины Ω в наших опытах оказались достаточно близкими.

Для горелок малых диаметров скорость выгорания $\dot{m}$ сравнительно велика [12]. С увеличением диаметра горелки величина $\dot{m}$ сначала уменьшается, а затем возрастает, пока не достигает определенного постоянного значения для данной жидкости (в резервуарах диаметром более 2 м). На скорость горения в малых горелках существенно влияют стенки корпуса горелки: пламя нагревает верхнюю кромку стенок до более высокой температуры, откуда за счёт теплопроводности тепло передаётся жидкости, что увеличивает скорость её испарения. Увеличение скорости горения с увеличением диаметра связано с переходом от ламинарного режима горения к турбулентному (сопровождается уменьшением полноты сгорания, образующая сажа увеличивает теплотери на излучение от пламени). При турбулентном горении возрастает процесс отвода паров от поверхности жидкости и скорость испарения увеличивается.

Блинов и Худяков [13] установили, что при горении жидкости в цилиндрических сосудах малых диаметров (менее 10 мм) при наблюдении ламинарного пламени (аналогия с диффузионным горением газа) остается постоянным отношение $w d^2 / 4h$, где w – линейная скорость выгорания жидкости в сосуде, d – диаметр сосуда, h – высота пламени. При увеличении диаметра горелки скорость ламинарного выгорания жидкости падает и при переходе к турбулентному режиму её падение прекращается. Затем она возрастает, стремясь к некоторому пределу. Уменьшение скорости горения с ростом d связано с тем, что подвод тепла от пламени за счёт теплопроводности происходит лишь на внешней части горелки и пропорционален её диаметру. Подвод тепла излучением пропорционален площади поперечного сечения горелки. Поэтому авторы предлагают зависимость типа $\dot{m} = b + a/d$. В тоже время указывают, что большая часть тепла, отводимого по стенкам камеры, рассеивается, что снижает значение $\dot{m}$.

Для выяснения влияния площади поверхности горения жидкости S на значение массовой скорости горения $\dot{M}$ и удельной массовой скорости выгорания $\dot{m}$ были проведены их измерения для этанола при различных размерах как плоской, так и сферической поверхностей (см. табл. 3). Результаты следующие.

Плоская поверхность. Наблюдается уменьшение величины $\dot{m}$ с возрастанием площади поверхности горения (испарения этанола). Согласно формуле (5) значение $\dot{m}$ обратно пропорционально её диаметру. Для плоской поверхности испарения можно принять параметр $\dot{m}d \approx \text{const}$.

При обработке фотоизображений пламени было установлено [14, стр. 178], что массовая скорость горения, отнесенная к фронту пламени для одного и того же горючего вещества не зависит от величины и формы плоской поверхности испарения и является постоянной величиной. Этот факт напоминает введение нормальной скорости распространения газов при горении газовых смесей. Однако подобный способ определения $\dot{m}$ является трудоёмким.

Таблица 3. Влияние площади и формы поверхности на экспериментальные значения массовой скорости горения этанола $\dot{M}$ [10^{-6} кг/с] и удельной массовой скорости выгорания $\dot{m}$ [10^{-3} кг/(м²·с)]. Здесь d – диаметр в мм, S – площадь поверхности в мм², $\dot{m}d$ [10^{-3} кг/(м·с)].

Плоская пористая поверхность				Пористая сфера			
$d, \text{мм} \rightarrow$	23.5	40	68	$d, \text{мм} \rightarrow$	11.5	21.0	35.0
$S = \pi d^2/4$	433	1256	3630	$S = \pi d^2$	415	1385	3847
$\dot{M}$	12.4	18.1	36.0	$\dot{M}$	11.3	28.6	16.6
$\dot{m}_{\text{эксп}}$	28.7	14.0	9.9	$\dot{m}_{\text{эксп}}$	27.1	20.6	16.7
$\dot{m}d$	0.67	0.57	0.68	$\dot{m}d$	0.31	0.43	0.58
$\dot{m}_{\text{расч}}$ по (6)	23.7	31.2	41.2	$\dot{m}d^{0.25}$	8.89	7.89	7.20
$\dot{m}_{\text{расч}}$ по (7)	23.2	26.5	38.7	$\dot{m}d^{0.45}$	3.64	3.64	3.68

Если в [5] Баратов А.Н. приводит результаты, полученные при стандартной методике, описанной в ГОСТе 1984 года, где исследования проводятся на горелке одного диаметра $d = 10$ мм, то в более позднем ГОСТе 1991 года [15] диапазон используемых размеров горелок расширен от 10 до 60 мм. При увеличении размера горелки происходит переход от ламинарного режима горения через пульсирующий к турбулентному (см. рис.3б – эксперименты авторов статьи, диаметр кюветы с шамотным порошком $d = 60$ мм). Отмечается, что в условиях ламинарного горения (при отсутствии колебаний и закручивании пламени) параметр $\dot{m}d$ монотонно убывают или слабо меняется с увеличением диаметра горелки. Для переходного режима горения характерно возрастание значений $\dot{m}d$.

Режим горения и значение удельной скорости выгорания жидкости можно рассчитать по числу Галилея $Ga = gd^3 / \nu_v^2$ и безразмерной скорости выгорания $\bar{M}$ [15]. Так для переходного режима, который и наблюдался в эксперименте:

$$\dot{m} = \bar{M} \rho_v \nu_v / d, \quad \nu_v = 33.5 \cdot 10^{-8} \left(\frac{T_b}{\mu_f} \right)^{1.5}, \quad \bar{M} = ABGa^{0.16} \quad \text{при} \quad 3 \cdot 10^6 < Ga < 4.8 \cdot 10^8,$$

$$A = 0.570 + 0.773s, \quad B = \frac{0.232Q / r - c(T_b - T_g)}{L + c_e(T_b - T_g)}, \quad s = \frac{\mu_o^2 n_o}{\mu_f^2 n_f}, \quad r = \frac{\mu_o n_o}{\mu_f n_f}, \quad (6)$$

где ν_v , ρ_v – кинематическая вязкость и плотность паров при температуре кипения горючей жидкости в [м²/с] и [кг/м³]; Q – низшая удельная теплота парообразования в [кДж/кг], L – удельная теплота парообразования жидкости при температуре кипения в [кДж/моль]; μ_o и μ_f – молярные массы кислорода и жидкости в г/моль; n_o и n_f – стехиометрические коэффициенты кислорода и жидкости в реакции горения, T_g – температура окружающей среды (293 К); c – изобарная теплоёмкость продуктов сгорания ($c = 1$ кДж/кг·К); c_e – средняя изобарная теплоёмкость жидкости в интервале от T_g до T_b .

Для этанола с $\rho_v = 789$ кг/м³, $c_e = 2.5$ кДж/(кг·К) результаты расчётов по (6) представлены в табл. 3. Видно, что полученные экспериментальные и расчётные значения удельной массовой скорости выгорания $\dot{m}_{\text{эксп}}$ и $\dot{m}_{\text{расч}}$ зависят от диаметра горелки.

В ГОСТе [15] за скорость выгорания исследуемой жидкости предлагается принимать скорость выгорания в турбулентном режиме. Расчётный диаметр горелки 10 м. При этом значение $\dot{m}$ можно оценить по формуле

$$\dot{m} = 0.168 \dot{m}_n (d_n^{0.52} / \nu_v^{0.34}), \quad (7)$$

где $\dot{m}_n$ – экспериментальное значение скорости выгорания в переходном режиме горения (от ламинарного к турбулентному) при диаметре горелки d_n . Результаты расчётов по (7), представленные в табл.3, показывают на согласование с расчётными значениями по (6). Стоит обратить внимание, что расчётные значения $\dot{m}_{\text{расч}}$ сильно зависят от размера горелки и приближаются к указанному справочному значению [5] при увеличении диаметра горелки уже при 70 мм. Расчёты для турбулентного режима горения при d горелки =10 м даёт значение $\dot{m} = 60 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с).

Сферическая поверхность. Как видно из экспериментальных результатов горения на пористой сфере (см. табл. 3), с ростом диаметра сферы d возрастает параметр $\dot{m}d$, что объясняется ролью конвекции.

Согласно Сполдингу [16, стр. 165] при горении сферической частицы $\dot{m}d \sim d^{3/4}$. При плёночном режиме кипения жидкости в состоянии насыщения $Nu \sim Gr^{1/4} \sim d^{3/4}$ [16, стр. 237]. Аналогично, при теплоотдаче естественной конвекции на сфере $Nu \sim Gr^{1/4} \sim d^{3/4}$ [17, стр. 231]. Из табл. 3 следует, что экспериментальные значения $\dot{m}d^{0.25}$ убывают с увеличением диаметра сферы. Постоянным остается комплекс $\dot{m}d^{0.45}$. То есть, используя (5), имеем $\dot{m}d \sim Nu \sim d^{0.95}$. Это можно объяснить усилением процесса теплообмена при совместном действии естественной конвекции и испарения горючей жидкости.

Выводы. Приводимые в справочной литературе значения удельных массовых скоростей выгорания жидких топлив $\dot{m}$ у ряда авторов, проводивших измерения, отличаются друг от друга, причём, весьма существенно (см. табл. 2а). Это объясняется разнообразием методик, в которых имели место разные технические параметры экспериментальных стендов, режимы горения и алгоритмы обработки полученных результатов. Так, от площади зоны выгорания (и, естественно, диаметра горелки) зависит режим горения топлива – ламинарный, переходный, турбулентный. Также на результаты измерений $\dot{m}$ оказывает влияние начальная температура жидкости, её уровень в горелке, теплопроводность материала корпуса горелки, его толщина и др.

Анализ этих факторов, табличных значений и их сопоставление с опытными данными, полученными авторами настоящей работы с использованием собственного оригинального экспресс-метода, показал, что вполне оправдано введение некоего параметра Ω . Он отражает сопоставление измеренного значения скорости выгорания исследуемого топлива $\dot{m}_{uc}$ с подобной величиной для эталонного горючего $\dot{m}_э$. В качестве такового был выбран распространённый и доступный в экспериментальной практике этанол. Сравнение величины параметра $\Omega = \dot{m}_{uc} / \dot{m}_э$, рассчитанного для разных горючих жидкостей (см. табл. 2б), показало не столь значительное различие Ω , как это имеет место для $\dot{m}$.

Преимуществом предложенного авторами метода с пористыми поверхностями (плоскими и сферическими) для определения массовой скорости горения $\dot{M}$ (а по ней расчёта удельной массовой скорости выгорания $\dot{m}$) является наличие на зависимости $M = f(t)$ длительного временного участка с характерной линейностью убыли массы. Так, в методе пористой сферы линейный участок занимает более половины общего времени горения в отличие от выгорания с плоской поверхности, где участок составляет около 1/3 или меньше от общего времени. Поверхность испарения горючего из образца на этом прямолинейном участке остается практически постоянной. В предлагаемом методе пористой сферы, согласно рис. 3, пульсации пламени возникают вдали от сферы. Поэтому испарение жидкости происходит практически равномерно с её поверхности.

Ещё одним преимуществом предложенного экспресс-метода является возможность самостоятельно создать опытную установку на основе электронных весов с точностью 1 мг и обычной веб-камеры без использования специального инструмента и технологического навыка. Для проведения опытов требуется небольшое количество жидкости,

Метод пористых поверхностей позволяет достаточно быстро провести сравнение удельных массовых скоростей выгорания жидких топлив (в том числе смесей, эмульсий и топлив с большой вязкостью) относительно некоторой широко применяемой жидкости (например, этанола). При этом следует отметить, что сравнительно достоверным результатом является относительная величина Ω , так как количественное значение удельной массовой скорости выгорания $\dot{m}$ в этом методе может зависеть от размера пор огнеупорного материала, что представляет собой задачу будущих исследований.

Список литературы:

1. *Manzello S. L. (ed.), Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires. – Springer Nature Switzerland AG. – 2018.*
https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_50-1
2. *Iveta Marková, Jozef Lauko, Linda Makovická Osvaldová, Vladimír Mózer, Jozef Svetlík, Mikuláš Monoši and Michal Orinčák Fire Size of Gasoline Pool Fires // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020 – 17, 411; doi:10.3390/ijerph17020411*
3. *Carine Chivas, Jean-Pierre Bertrand, Stéphane Duplantier, Laurent Audouin, Laurence Rigollet. Method to obtain large scale burning rate of liquids with lab scale tests. / 11 International Interflam Conference, Sep 2007, Londres, United Kingdom. pp.403-414. https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00976192*
4. *Jinhui Wang, Xin Cui, Ruiqing Zhang, Qimiao Xie, Shaogang Zhang, Long Shi Study on the mass loss rate of liquid pool fire in a well-confined ship cabin // International Journal of Thermal Sciences 166 (2021) 106984 https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106984*
5. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд. : в 2 книгах // *Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. и др.* – М., Химия, 1990. – 496 с.
6. *Вильямс Ф.А. Теория горения. – М.: Наука, 1971. – 615 с.*

7. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – Москва: Наука, 1974. – 720 с.
8. Rew P.J., Hilbert W.G. Development of pool fire thermal radiation model//HSE contract research report №96 (1996)
https://www.hse.gov.uk/research/crr_pdf/1996/crr96096.pdf
9. Кнорре Г.Ф. Теория топочных процессов. – Энергия, 1966. – 461с.
10. Хитрин Л.И. Основы горения углеводородных топлив. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 663 с.
11. Патент на винахід. Селиванов С.Є., Калінчак В.В., Кулик М.І. “Пристрій для визначення швидкості вигорання рідини”. Бюллетень № 3 від 11.02.2008.
12. Демиров П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
13. Бахман Н.Н., Беляев А.Ф. Горение конденсированных систем. – 1967. – М. Наука. – 228 с.
14. Хзмалян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства. – 1976. – М. Энергия. – 488 с.
15. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения : ГОСТ 12.01.044-89. - Издание официальное. – М, 1991. - 100 с.
16. Основы теории горения: Физика / Д.Б. Сполдинг – М.: Книга по Требованию, 2013. – 320 с.
17. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под ред. В.А. Григорьев, В.М. Зорин. – 1988. – 560 с.

**Черненко О.С., Шингарьов Г.Л., Іванов М.О., Калінчак В.В.,
Копійка О.К.**

Визначення швидкості вигорання рідкого палива

АНОТАЦІЯ

У роботі розглядається запропонований авторами експрес-метод експериментального визначення масової швидкості вигорання рідких горючих речовин. Описуються дослідження, що проводяться з різними рідинами, якими просочувалися вироби з термостійкого пористого матеріалу у вигляді сфер або плоских циліндричних «таблеток» різних діаметрів. Ці вироби поміщалися на цифрові ваги та підпалювалися. Відеокамера, зістикована з комп'ютером, записувала показання ваги і одночасно відстежувала процес горіння, фіксуючи значення поточного часу t . При обробці відеофайлу будувалася залежність маси рідини, що вигоряє на зразку від часу $M = f(t)$. На цьому графіці виділялася лінійна ділянка для вимірювання швидкості зменшення маси, а за нею розраховувалася питома масова швидкість вигорання рідини $\dot{m}$. Результати порівнювалися з даними, отриманими іншими дослідниками у дослідженнях за різними методиками визначення: зокрема, з методами "стаціонарної сфери", "підвішеної краплі", вигорання в трубчастому пальнику, а також з плоскою вільною поверхнею.

Ключові слова: пориста сфера, швидкість горіння, рідина

**Chernenko A.S., Shyngarov G.L., Ivanov M.A., Kalinchak V.V.,
Kopiyka A.K.**

Measuring the burnout rate of flammable liquids

SUMMARY

The article discusses the express method proposed by the authors for experimental measurement of the mass burnout rate of liquid combustible substances. Describes the experiments carried out with various liquids, which impregnated products made of porous heat-resistant material in the form of spheres or flat cylindrical "tablets" of different diameters. These products were placed on digital scales and set on fire. A video camera connected to a computer recorded the readings of the scales and simultaneously monitored the combustion process, fixing the value of the current time t . When processing the video file, the dependence of the mass of the liquid burning on the sample on time $M = f(t)$ was plotted. On this graph, a linear section was allocated to measure the mass loss rate, and the specific mass burnout rate of the liquid $\dot{m}$ was calculated from it. The results were compared with data obtained by other researchers in experiments using various methods for determining $\dot{m}$: in particular, with the methods of "stationary sphere", "suspended drop", burnout in a tubular burner, and also from a flat free surface.

Key words: porous sphere, burning rate, liquid.