

**О ГОРЕНИИ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРАХ
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕЕ УРОВНЯ**

Е. С. Артеменко, В. И. Блинов

(Ленинград)

В работе [1], относящейся к диффузионному горению жидкости в резервуарах, установлен ряд важных закономерностей и дана более или менее полная картина механизма этого сложного явления. Работа проводилась с полными резервуарами, а практика, как правило, имеет дело с емкостями, которые частично заполнены. Кроме того, механизм горения в неполных резервуарах в известной степени отличается от механизма горения в полных резервуарах.

Описание установки. При выполнении работы использовались прозрачные кварцевые трубки с диаметром 15, 22, 36, 50 и 80 мм и тонкостенный цилиндрический резервуар из нержавеющей стали диаметром 150 мм. Положение уровня жидкости (авиационный бензин или изоамиловый спирт) в кварцевых трубках определялось с помощью катетометра, а в стальном резервуаре — по положению мениска в «водомерной» трубке.

Исследуемая жидкость зажигалась и через определенные промежутки времени определялось положение уровня. Термопарой, введенной в резервуар, измерялась температура ϑ_r на поверхности жидкости.

Результаты опытов. Пламена исследованных жидкостей были светящимися. По мере выгорания жидкости высота пламени уменьшалась

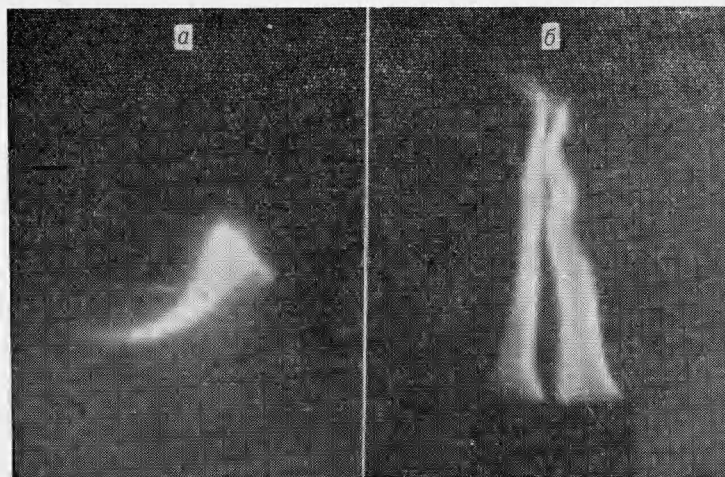


Рис. 1. Форма пламени авиабензина, сгорающего в кварцевых цилиндрических трубках диаметром 22 (а) и 80 мм (б).

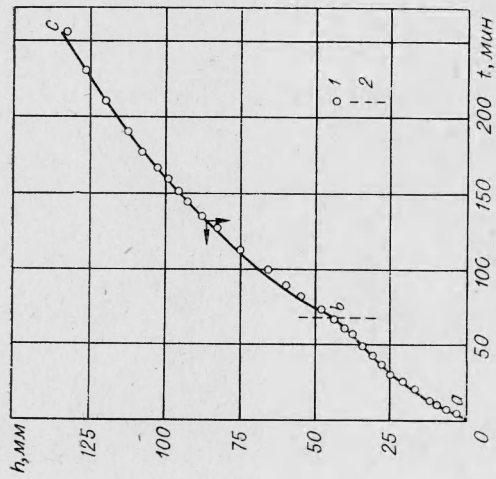


Рис. 2. Зависимость h от t для авиационного топлива в кварцевом резервуаре диаметром 80 мм.
1 — усредненные опытные данные; 2 — момент вхождения пламени в трубку.

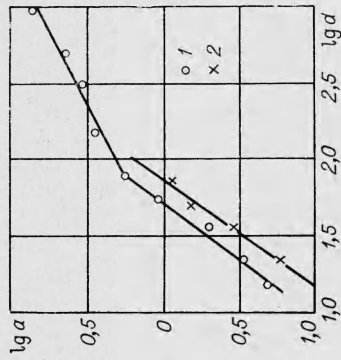


Рис. 3. Зависимость коэффициента a от диаметра резервуара.
1 — опытные данные для бензина; 2 — для изоамилового спирта.

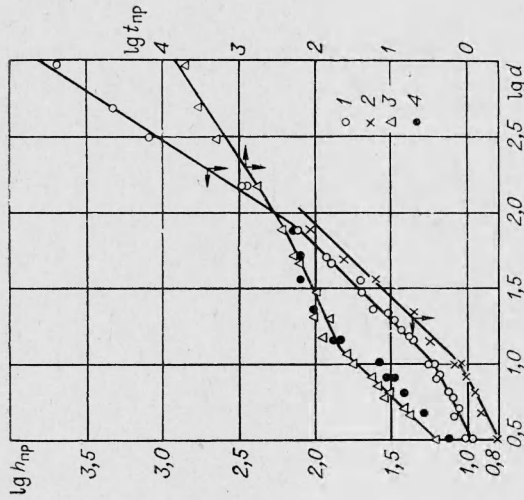


Рис. 4. Зависимость $h_{пр}$ и $t_{пр}$ от диаметра резервуара.
1 — $h_{пр}$ бензина; 2 — $t_{пр}$ бензина; 3 — $h_{пр}$ изоамилового спирта; 4 — $t_{пр}$ изоамилового спирта.

и по истечении некоторого времени, разного для разных резервуаров, пламя входило в трубку, соответственно изменив свою форму (рис. 1). В узких трубках пламя было спокойным и лишь иногда медленно поворачивалось вокруг оси трубки, а в широких — пульсировало.

На рис. 2 приведена кривая, изображающая зависимость расстояния h от времени t от среза горелки до поверхности бензина. Кривая $h(t)$ состоит из двух частей. Первая часть (ab) показывает изменение уровня жидкости в том случае, когда пламя еще не проникло в резервуар, а вторая (bc) — когда основание находится в горелке. При вхождении пламени в резервуар скорость сгорания заметно возрастала. В других опытах наблюдалась картина, сходная с приведенной на рис. 2.

После достижения некоторой глубины и по истечении соответственного времени пламя гасло. Эти значения h и t в последующем будем называть предельными и обозначать $h_{пр}$ и $t_{пр}$.

Полученные опытные данные хорошо описываются следующим эмпирическим уравнением

$$L^m = a\tau, \quad (1)$$

где $L = h - h_0$; $\tau = t - t_0$; h_0 и t_0 — координаты точки b слома кривой $h(t)$; a — коэффициент, зависящий от природы жидкости и диаметра d резервуара. Показатель степени m не зависит от величины d и для бензина оказался равным 1,25, а для изоамилового спирта — 1,1. О согласии формулы (1) с опытом можно судить по рис. 2, где кривая bc проведена по точкам, вычисленным по этой формуле.

Коэффициент a , как видно из рис. 3, закономерно растет с увеличением диаметра резервуара. Результаты экспериментов ложатся на две пересекающиеся прямые¹. При $d < 80$ мм для бензина

$$a = 4,9 \cdot 10^{-3} d^{4/3},$$

а при $d > 80$ мм

$$a = 0,20 d^{1/2}.$$

Данные для изоамилового спирта относятся лишь к первой области и хорошо описываются формулой

$$a = 2,25 \cdot 10^{-3} d^{1,4}.$$

На рис. 4 нанесены логарифмы опытных значений $h_{пр}$ и $t_{пр}$. Здесь использованы данные, полученные авторами при работе с узкими кварцевыми и стеклянными трубками, и некоторые результаты, приведенные в [1].

Как видно, опытные точки для бензина хорошо ложатся на три прямые. Оказалось, что в области $d < 10$ мм хорошо выполняется соотношение $h_{пр} = h_{01} \sqrt{d}$; в области $10 \text{ мм} \leq d \leq 80 \text{ мм}$, $h_{пр} = h_{02} d$, а при $d > 80$ мм $h_{пр} = h_{03} d^{1,6}$.

Данные для изоамилового спирта близки к результатам, относящимся к бензину.

На пересекающиеся прямые ложатся и логарифмы опытных зна-

¹ Здесь использовались некоторые данные, приведенные в [1] и относящиеся к горению жидкости в резервуарах с диаметрами 300, 500 и 900 мм.

чений $t_{\text{пр}}$. В одной области $t_{\text{пр}} = t_{01} d^2$, а в другой — $t_{\text{пр}} = t_{02} d^{3/4}$ и в третьей — $t_{\text{пр}} = t_{03} d^{5/4}$.

Во время опытов измерялось расстояние H от основания пламени до края резервуара. Эти измерения осложнялись пульсацией и изменением формы пламени и потому не были достаточно точными.

Расстояние от основания пламени до края резервуара возрастало с течением времени по закону

$$H^k = b \tau. \quad (2)$$

Показатель степени k для всех опытов с бензином и изоамиловым спиртом был одинаков и равен 1,33, коэффициент b для бензина — $5,5 \cdot 10^{-3} \cdot d^{1/4}$, а для изоамилового спирта — $1,45 \cdot 10^{-2} \cdot d^{1/4}$. Измерения H проводились только в опытах с резервуарами, диаметры которых лежат в пределах от 22 до 80 мм. Расстояние l от основания пламени до свободной поверхности горячей жидкости в только что указанной области увеличивалось с течением времени по линейному закону.

В двух опытах бензин сжигался в кварцевой трубке диаметром 50 мм, верхний конец которой был закрыт металлической крышкой с круглым центральным отверстием. Диаметр отверстия в одном опыте равнялся 35, а в другом — 22 мм. Слом кривой $h(t)$ в этих опытах не наблюдался и опытные данные вполне удовлетворительно описывались уравнением

$$h^n = jt,$$

где t — время от начала горения; h — расстояние от поверхности жидкости до края горелки.

В табл. 1 приведены некоторые характеристики, относящиеся к рассматриваемым опытам. Из рассмотрения таблицы видно, что с уменьшением d_0 быстро уменьшаются v и $v_{\text{пр}}$, а приведенные значения v' и $v'_{\text{пр}}$ остаются постоянными. Интересно отметить, что такая же за-

Таблица 1

d_0	$h_{\text{пр}}$	$t_{\text{пр}}$	$v_{\text{пр}}$	$v'_{\text{пр}}$	\bar{v}	\bar{v}'	n	j
50	75	173	0,22	0,22	0,43	0,43	1,43	2,95
35	59	300	0,11	0,23	0,20	0,40	1,90	7,80
22	41	440	0,04	0,21	0,09	0,48	2,85	8,90

Примечание. Здесь d_0 — диаметр отверстия; \bar{v} — средняя скорость сгорания бензина, равная $h_{\text{пр}}/t_{\text{пр}}$; $v_{\text{пр}}$ — предельная скорость (скорость выгорания перед потуханием пламени); \bar{v}' и $v'_{\text{пр}}$ — приведенные скорости горения, равные произведению соответственных скоростей на отношение площади отверстия s_0 к площади поперечного сечения резервуара s .

кономерность наблюдалась при сгорании бензина в железобетонном резервуаре с диаметром 5300 мм [2].

Результаты, содержащиеся в табл. 1, показывают, что предельная глубина закономерно уменьшается, а предельное время увеличивается с уменьшением диаметра d_0 . Приближенно

$$t_{\text{пр}} = \frac{t'_0}{d_0^{3/8}}, \quad h_{\text{пр}} = h_0 d_0^{0,75}.$$

Надо отметить, что зависимость $t_{\text{пр}}$ от d_0 в рассматриваемом случае очень сильно отличается от зависимости $t_{\text{пр}}$ от диаметра резервуара.

Несколько опытов было проведено с целью выяснить, как изменяется горение жидкости при ее нагревании. Во время опытов бензин, подогреваемый спиралью, по которой протекал электрический ток, сжигался в кварцевой трубке диаметром 22 мм. Некоторые результаты этих опытов приведены в табл. 2.

Таблица 2

W	$h_{пр}$	$t_{пр}$	l	ϑ_r	\bar{v}
0	32	108	18	60	0,30
6,2	44	177	38	80	0,25

Примечание. Здесь W — мощность нагревателя, *вт*; l — расстояние от пламени до жидкости в конце опыта; \bar{v} — средняя скорость выгорания; ϑ_r — температура на поверхности жидкости в конце опыта.

При нагревании жидкости возрастало расстояние основания пламени от жидкости, увеличивались предельная глубина и предельное время горения, повышалась температура на поверхности, а средняя скорость горения почти не менялась. При $W=8,5$ *вт* жидкость кипела, а пламя в горелку не входило. Если мощность нагревателя уменьшалась, то пламя начинало опускаться в трубку, а при должном увеличении W снова вытеснялось из горелки. При малых мощностях заметных изменений в протекании явления не наблюдалось.

Обсуждение результатов. Скорость сгорания жидкости в резервуаре определяется скоростью движения пара от жидкости и кислорода из атмосферы к пламени. Скорость движения кислорода к зоне горения, когда пламя находится в цилиндре, можно определить, используя приемы, применяемые в теории теплопередачи [3]. К нужному соотношению можно прийти следующим путем.

Допустим, что пламя имеет форму диска, перпендикулярного к оси резервуара, что концентрация кислорода c в пламени практически равна нулю и что распределение c зависит только от координаты x , направленной вдоль оси емкости. Примем, что у среза горелки $c=c_0$ (c_0 — концентрация кислорода в атмосфере). Если бы подвод кислорода к зоне горения осуществлялся молекулярной диффузией, то масса кислорода, подведенного к пламени, на основании закона Фика, определялась бы соотношением

$$dM = D \frac{c_0}{H} S dt,$$

где D — коэффициент диффузии кислорода, но

$$\frac{1}{S} \cdot \frac{dM}{dt} = \gamma \rho \frac{dh}{dt} = \gamma \rho \frac{dL}{d\tau} = \gamma \rho v.$$

Здесь ρ и v — плотность и удельная объемная скорость сгорания жидкости; γ — коэффициент, равный отношению массы кислорода к массе горючего, прореагировавшего с кислородом.

В том случае, когда диффузия конвективная, вместо D следует ввести коэффициент конвективной диффузии D_k . Отношение D_k к D назовем коэффициентом конвективности:

$$\epsilon_k = \frac{D_k}{D}.$$

Естественно допустить, что

$$\epsilon_k = B \left(\frac{H}{d} \right)^p \text{Gr}^q, \quad (3)$$

где Gr — критерий Грасгофа, а B — множитель, в который могут войти те или иные критерии, не зависящие от d и H .

Приняв, что

$$L \sim H^0, \quad (4)$$

получим

$$L^m = a \tau \text{ и } H^k = b \tau, \quad (5)$$

где a и b — коэффициенты, зависящие от диаметра.

Формулы (5) идентичны с эмпирическими соотношениями (1) и (2). Из (3) и (4) следует, что

$$\frac{\nu H}{D} = A \left(\frac{H}{d} \right)^p Gr^q \frac{c_0}{\rho}. \quad (6)$$

Это уравнение связывает безразмерные величины. Критерий $\nu H/D$ аналогичен критерию Нуссельта для массообмена. Критерий Грасгофа следует, по-видимому, определить известным соотношением $Gr = \frac{\beta g d^3 \Delta \nu}{\nu^2}$, иногда используемым в теории горения капель топлива [4]. Коэффициент A пропорционален коэффициенту B формулы (3).

Уравнение (6) удовлетворительно описывает все результаты, полученные при значениях показателей степеней, приведенных в табл. 3. Из таблицы видно, что в рассматриваемых случаях при переходе из области, где $15 \text{ мм} \leq d \leq 80 \text{ мм}$, в область, в которой $d > 80 \text{ мм}$, показатель степени q уменьшился почти вдвое. Здесь, по-видимому, имеет место картина, подобная той, которая наблюдается при конвективной теплопередаче, где с увеличением критерия Gr уменьшается показатель степени в известной формуле [3]

$$Nu = c (Gr Pr)^n.$$

Зависимость коэффициента a , предельной глубины, предельного времени и показателя степени q от диаметра резервуара показывает,

Таблица 3

Определяемые величины	Изоамиловый спирт	Бензин	
	$15 \text{ мм} < d \leq 80 \text{ мм}$	$15 \text{ мм} < d \leq 80 \text{ мм}$	$d > 80 \text{ мм}$
p	0,88	0,73	0,75
q	0,76	0,69	0,42

что при горении жидкости в резервуарах при понижении уровня горючего также, как и при горении жидкости в полных резервуарах [5, 6], имеют место три режима. Если диаметр резервуара не превышает 10 мм , то горение ламинарное и пламя

жидкости в горелку не проникает. Если диаметр d не меньше 10 и не больше 80 мм , то пламя входит в резервуар и режим горения можно считать переходным. При $d > 80 \text{ мм}$ горение турбулентное.

Горение жидкости в резервуаре поддерживается диффузией пара от поверхности жидкости к зоне горения. Здесь заметную роль играет конвекция, а жидкость получает энергию от пламени в основном путем излучения, если d не меньше 30 мм .

Как отмечалось, горение жидкости в резервуарах, закрытых диафрагмами с различными отверстиями, подчиняется закономерностям, которые существенно отличаются от соответственных закономерностей горения в открытых резервуарах. Это вполне понятно. При наличии диафрагм условия, при которых происходит движение кислорода к пламени, мало меняются с течением времени. Поэтому скорость горения и

предельные величины h и t определяются не скоростью подвода кислорода к зоне горения, а скоростью подвода энергии к горящей жидкости.

При нагревании жидкости нагревателем усиливается скорость испарения, возрастает расстояние от жидкости до пламени, понижается количество тепла, получаемого жидкостью от пламени, и самогашение пламени происходит при большей предельной глубине. Если мощность нагревателя относительно велика, то расстояние от пламени до жидкости большое и подвод тепла от пламени к жидкости мал и не играет существенной роли. В предельном случае движение пара так велико, что пламя в трубку не входит и горение происходит у среза резервуара. Скорость сгорания в последнем случае определяется скоростью подвода энергии от нагревателя к жидкости.

* * *

Проведенное экспериментальное исследование и анализ полученных опытных данных позволили сделать следующие выводы. Если горючую жидкость, наполнившую резервуар, воспламенить, то вначале высота пламени понижается, уменьшается скорость выгорания жидкости. Затем основание пламени проникает в резервуар и скорость сгорания возрастает. По мере дальнейшего понижения уровня жидкости скорость сгорания закономерно уменьшается и при некотором предельном расстоянии от среза горелки пламя гаснет.

Имеют место три режима горения жидкостей в резервуаре. Один — ламинарный, когда пламя не проникает в резервуар. Это наблюдается при значении диаметра d , не превышающем 10 мм; второй режим — переходный. Он имеет место при сгорании жидкостей в резервуарах с диаметром от 10 до 80 мм. Третий — турбулентный наблюдается при горении жидкостей в резервуарах с диаметром, большим 80 мм.

Установлено, что выгорание жидкости в резервуаре в том случае, когда основание пламени находится внутри емкости, подчиняется уравнению (6). Показатель степени q меняется при переходе от одного режима к другому. Полученный материал позволил заключить, что энергия от пламени к жидкости в основном передается излучением, если d не меньше 30 мм. Опыты с жидкостями, сгорающими в резервуарах, закрытых диафрагмами с центральными отверстиями, показали, что скорость сгорания в этом случае определяется скоростью подвода энергии к жидкости от пламени, а прекращение горения вызвано не кислородным недостатком, а малым количеством энергии, подводимой к горючему от зоны горения.

Удалось выяснить некоторые особенности процесса горения при подводе к жидкости тепла от нагревателя, помещенного в жидкость.

Поступила в редакцию
19/IV 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Блинов, Г. Н. Худяков. Диффузионное горение жидкостей. М., Изд-во АН СССР, 1961.
2. И. И. Петров, В. Ч. Реутт. О горении жидкостей в железобетонных резервуарах. Инф. сб., ЦНИИПО, 1965.
3. М. А. Михеев. Основы теплопередачи. М., Госэнергоиздат, 1947.
4. Л. А. Клячко. Сб. «Горение двухфазных систем». М., Изд-во АН СССР, 1958.
5. В. И. Блинов. Изв. АН СССР, ОТН, 1956, 4.
6. В. И. Блинов, Г. Н. Худяков. Докл. АН СССР, 1957, 113, 5; Сб. «Некоторые вопросы горения». М., Изд-во АН СССР, 1958.