

О ТЕМПЕРАТУРЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ, ГОРЕНИЯ  
И ПОТУХАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В РЕЗЕРВУАРАХ

Е. С. Артеменко, В. И. Блинов  
(Ленинград)

Давно известно, что температура воспламенения  $\vartheta_{в}$  углерода выше температуры его потухания  $\vartheta_{п}$  [1—3]. Но до последнего времени не было установлено, в каком соотношении находится температура воспламенения и потухания жидкости. Обычно считают, что пламя жидкости гаснет, когда температура последней становится равной температуре воспламенения [4]. Не выяснена и связь между изменением температуры горения  $\vartheta_{г}$  (температуры на поверхности горячей жидкости) и воспламенения при изменении условий. Выяснению этих вопросов, относящихся к температурам горения, воспламенения и потухания, и посвящена данная экспериментальная работа.

**Описание установки.** Опыты велись с амиловым спиртом. Резервуарами служили кварцевые прозрачные трубки с диаметрами 22; 36; 56 и 80 мм. Термопарами медь—константан измерялись температуры  $\vartheta_{г}$ ,  $\vartheta_{в}$  и  $\vartheta_{п}$  при разном положении уровня в резервуарах (рис. 1).

При определении температуры горения термопара опускалась на 3—4 мм ниже уровня горячей жидкости. Через промежутки времени, равные 0,5—1 мин, измерялась э. д. с. термопары. По мере выгорания жидкости ее свободная поверхность приближалась к спаю. В некоторый момент времени последний оказывался в поверхностном слое, а затем выходил в паровую фазу. При этом наблюдалось резкое изменение э. д. с. По точке слома кривой э. д. с.—время и определялась температура на поверхности горячей жидкости (температура горения).

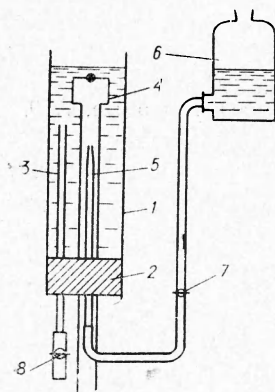


Рис. 1. Схема установки.

1 — резервуар; 2 — резиновая пробка; 3 — сливная трубка; 4 — термопара; 5 — трубка, из которой при гашении пламени вытекает струя; 6 — склянка с жидкостью; 7 — кран; 8 — зажим.

Во время опытов по определению температуры воспламенения в жидкости находилась металлическая спираль, нагреваемая электрическим током. Перед опытом устанавливалось нужное положение уровня жидкости в резервуаре. Спаи термопары располагались в поверхностном слое. Включался ток в цепи нагревателя. Через небольшие промежутки времени измерялась э. д. с. термопары, а к открытому концу резервуара подносилось маленькое пламя городского газа, вытекающего из узкой стеклянной горизонтальной трубки. Фиксировалась та температура на поверхности жидкости, при которой возникшее пламя

не гасло. Затем ток в нагревателе выключался и в течение примерно 10 мин измерялась температура  $\theta$  на поверхности воспламенившейся жидкости.

Наибольшие трудности возникли при определении температуры потухания горячей жидкости. Был испытан ряд способов. Наиболее удобным оказался метод, основанный на использовании перемешивания жидкости жидкостью [4—6]. Опыты велись следующим образом. Сначала верхний конец сливной трубки 3 и спай термодпары 4 устанавливались в одной горизонтальной плоскости и на том расстоянии от края резервуара, для которого нужно было найти температуру потухания. Конец трубки 5, соединенной со склянкой 6, помещался на 10—12 см ниже спаи термодпары. Поднимая склянку 6, наполняли резервуар исследуемой жидкостью и зажигали. Через 2—3 мин при помощи склянки 6 уровень жидкости медленно опускали и устанавливали на 4—5 мм выше спаи термодпары, кран 7 закрывали. Жидкость выгорала, и в ней устанавливался соответственный тепловой режим. Тогда, когда спай термодпары и конец трубки 3 оказывались в поверхностном слое, открывался кран 7 и зажим 8. Холодная жидкость вытекала из трубки 5, в жидкости возникала вертикальная затопленная струя, охлаждающая поверхностный слой. Избыток жидкости стекал через сливную трубку 3. Уровень жидкости в резервуаре практически не менялся, если степень открытия крана и зажима были предварительно должным образом подобраны.

В некоторый момент времени пламя гасло сначала в центре, а затем и у стенок резервуара. В это время измерялась температура на поверхности жидкости. Она и принималась за температуру потухания ( $\theta_n$ ).

**Результаты опытов.** 1. Опыты, проведенные ранее [5, 7], показали, что скорость выгорания жидкости в резервуарах уменьшается по мере увеличения расстояния  $h$  уровня жидкости от края резервуара; если величина  $h$  больше некоторого предельного значения  $h_{пр}$ , то жидкость в резервуаре не горит. Предельная глубина зависит от природы жидкости и диаметра резервуара. Если диаметр  $d$  резервуара больше 10 и меньше 80 мм, то  $h_{пр} = h_1 d$ , а при  $d > 80$  мм  $h_{пр} = h_2 d^{1.5}$ . Здесь  $h_1$  и  $h_2$  соответственные коэффициенты.

2. На рис. 2 приведены результаты опытов по определению значений  $\theta_v$ ,  $\theta_r$  и  $\theta_n$  при разном положении уровня в использованных резервуарах. Из рисунка видно, что опытные значения  $\theta_r$  и  $\theta_v$  для каждого резервуара располагаются на одной кривой, ограничивающей некоторую область, имеющую форму полуострова. Максимальные значения  $h$  каждой области практически совпадают с предельными величинами  $h_{пр}$ , о которых говорилось выше. Таким образом, правее каждого полуострова располагается область таких расстояний от уровня жидкости до края горелки, при которых жидкость в резервуаре не горит.

Рис. 2 показывает, что в полных горелках, в согласии с литературными данными [5], температура горения амилового спирта в опытах была равна 120—125°С, т. е. близка к температуре кипения спирта, но несколько ниже последней. Температура на поверхности жидкости, сгоравшей в резервуаре с диаметром 22 мм, все время понижалась и при значении  $h$ , близком к предельному, равнялась 90°С, т. е. была значительно ниже температуры кипения. При горении спирта в резервуаре с диаметром 36 мм температура  $\theta_r$  сначала понижалась, а затем при изменении  $h$  от 10 до 30 мм практически не менялась и при приближении к предельному значению снова начинала заметно понижать-

ся. Температура на поверхности амилового спирта, сгоравшего в резервуарах с диаметром 56 и 80 мм, оставалась практически постоянной при увеличении  $h$  и лишь вблизи  $h_{пр}$  начинала падать.

Картина, сходная с описанной, наблюдалась и при горении авиационного бензина. Оказалось, что практически постоянной при понижении уровня оставалась температура горения бензина и в резервуаре с диаметром 150 мм. Отсюда можно заключить, что температура горения жидкостей в резервуарах, диаметры которых не меньше 56 мм, практически не меняется с увеличением  $h$ , близка к температуре кипения и падает только вблизи  $h_{пр}$ .

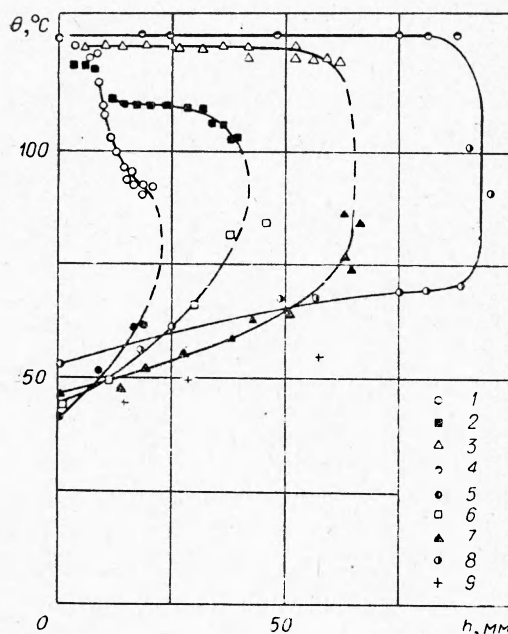


Рис. 2. Зависимость температуры горения и воспламенения от величины  $h$  для резервуаров с различными диаметрами.

Экспериментальные значения: 1 — температура горения в резервуаре с диаметром 22 мм; 2 —  $\vartheta_r$  при  $d=36$  мм; 3 —  $\vartheta_r$  при  $d=56$  мм; 4 —  $\vartheta_r$  при  $d=80$  мм. Опытные данные: 5 — температура воспламенения в резервуаре с диаметром 22 мм; 6 —  $\vartheta_B$  при  $d=36$  мм; 7 —  $\vartheta_B$  при  $d=56$  мм; 8 —  $\vartheta_B$  при  $d=80$  мм; 9 — температура потухания амилового спирта в резервуаре с диаметром 80 мм.

с изменением положения уровня жидкости, находятся в полном согласии с данными, содержащимися в [8, 9] и полученными при проведении опытов, во время которых использовались стеклянные трубки с диаметром 3 мм. Но надо заметить, что закономерности, наблюдаемые при работе с трубками, диаметр которых меньше 10 мм, естественно, отличаются от закономерностей, имеющих место при применении трубок большего диаметра. Действительно, в первом случае основную роль при воспламенении играет транспорт пара к зоне горения, а в последнем — кислорода.

3. Если  $h < h_{пр}$ , а температура жидкости равна температуре воспламенения, то воспламенившаяся жидкость нагревается, температура  $\theta$  на ее поверхности растет и достигает температуры горения. Полученные опытные данные хорошо описываются формулой

$$\frac{\theta - \vartheta_r}{\vartheta_B - \vartheta_r} = e^{-\alpha t}, \quad (2)$$

где  $t$  — время, отсчитанное от момента воспламенения, а  $\alpha$  — коэффи-

циент, зависящий от диаметра резервуара. Приближенно  $a \sim d^{-4/3}$ . Температура  $\vartheta_{0в}$  в наших опытах несколько увеличивалась с увеличением  $d$ .

Результаты, полученные и относящиеся к изменению  $\vartheta_B$  с увеличением положения уровня жидкости, находятся в полном согласии с данными, содержащимися в [8, 9] и полученными при проведении опытов, во время которых использовались стеклянные трубки с диаметром 3 мм. Но надо заметить, что закономерности, наблюдаемые при работе с трубками, диаметр которых меньше 10 мм, естественно, отличаются от закономерностей, имеющих место при применении трубок большего диаметра. Действительно, в первом случае основную роль при воспламенении играет транспорт пара к зоне горения, а в последнем — кислорода.

$$\vartheta_B = \vartheta_{0в} + ah, \quad (1)$$

где  $\vartheta_{0в}$  — температура воспламенения жидкости в полном резервуаре, а  $a$  — коэффициент, зависящий от диаметра резервуара. Приближенно  $a \sim d^{-4/3}$ . Температура  $\vartheta_{0в}$  в наших опытах несколько увеличивалась с увеличением  $d$ .

Результаты, полученные и относящиеся к изменению  $\vartheta_B$

циент, который при использовании резервуара с диаметром 56 мм от  $h$  не зависел и в среднем равнялся  $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ сек}^{-1}$ .

О степени согласия вычисленных по формуле (2) и опытных значений  $\theta$  можно судить по рис. 3.

4. Если расстояние от поверхности жидкости до края резервуара было больше предельного, то при надлежащем нагревании жидкости и поднесении пламени к срезу горелки происходила вспышка, у поверхности жидкости возникало пламя. По истечении небольшого промежутка времени оно гасло.

5. На рис. 2 нанесены опытные значения температуры потухания амилового спирта, сгоравшего в резервуаре с диаметром 80 мм. Как видно, измеренная температура потухания оказалась на  $11-12^\circ$  ниже температуры воспламенения при одинаковых значениях  $h$ . Но, по-видимому, приведенные значения  $\vartheta_{\text{п}}$  несколько занижены. Действительно, при гашении пламени уровень жидкости всегда немного поднимался, а это приводило к тому, что температура, фиксируемая термопарой, была несколько ниже той, которая имелаась на поверхности. Разница могла достигать нескольких градусов. Таким образом, проведенные опыты показывают, что температура потухания амилового спирта близка к температуре воспламенения и отличается от последней не более чем на  $10^\circ$ .

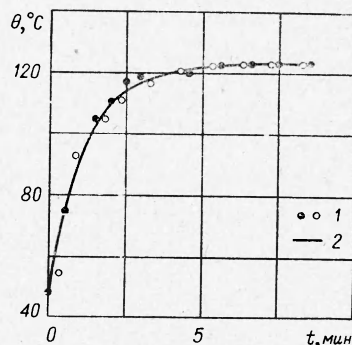


Рис. 3. Изменение со временем температуры на поверхности воспламенившейся жидкости.

1 — результаты двух опытов;  
2 — кривая, построенная в соответствии с (2).

## ВЫВОДЫ

При проведении данной работы изучались температура воспламенения, горения и потухания амилового спирта при разном положении его уровня в резервуаре. Использовались кварцевые трубки с диаметром 22; 36; 56 и 80 мм.

Было установлено, что температура воспламенения  $\vartheta_{\text{в}}$  возрастает при увеличении расстояния  $h$  от жидкости до края резервуара, подчиняясь приближенному соотношению (1). При приближении к предельной глубине  $\vartheta_{\text{в}}$  растет быстрее, чем следует из соотношения (1).

Температура горения в узких трубках изменялась по сложному закону, а в резервуарах с диаметром не меньше 50 мм почти не менялась с увеличением  $h$  и только при приближении к  $h_{\text{пр}}$  начинала падать.

При  $h = h_{\text{пр}}$  кривые  $\vartheta_{\text{г}}(h)$  и  $\vartheta_{\text{в}}(h)$  смыкались, ограничивая некоторую область. При  $h < h_{\text{пр}}$  температура  $\theta$  воспламенившейся жидкости быстро возрастала с течением времени. Опытные данные хорошо описывались формулой (2).

Если расстояние жидкости от края горелки было больше предельной величины, то нагретая жидкость воспламенялась, но быстро гасла. Температура потухания жидкости оказалась несколько ниже температуры воспламенения, но разница между  $\vartheta_{\text{в}}$  и  $\vartheta_{\text{п}}$  не превышала  $10^\circ \text{C}$ .

Поступила в редакцию  
19/IV 1967

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Блинов. Тр. Воронежского гос. ун-та, 1939, т. 11, ф.-м. отдел, вып. 1.
2. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Изд-во АН СССР, 1961.
3. Л. А. Вулис. Тепловой режим горения. М., Госэнергоиздат, 1954.
4. И. И. Петров, В. Ч. Реутт. Тушение пламени горючих жидкостей. М., Изд. МКХ, 1961.
5. В. И. Блинов, Г. Н. Худяков. Диффузионное горение жидкостей. М., Изд-во АН СССР, 1961.
6. Новые способы тушения пламени нефтепродуктов. Сб. статей. М., Гостоптехиздат, 1960.
7. Е. С. Артеменко, В. И. Блинов. Инф. сб. ЦНИИПО, 1966.
8. В. И. Блинов. Докл. АН СССР, 1946, 52, 9.
9. П. Г. Ипатов. Инф. сб. ЦНИИПО, 1952.