

# Способы самотушения и предотвращения пожаров горящих жидкостей в емкостях и резервуарах

**В.И. Потякин,**

к.т.н., ведущий инженер Специального конструкторского бюро  
ОАО "Приборный завод "Тензор", г. Дубна

**При проектировании и строительстве крупномасштабных комплексов, предназначенных для хранения нефти и других легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, важнейшее значение приобретает задача, решение которой позволило бы обеспечить пожаробезопасную эксплуатацию подобного рода объектов.**

**Пожары на крупных хранилищах горючих жидкостей могут иметь тяжелые последствия не только для зданий и оборудования, находящихся на территории объекта, но и для экологии окружающей среды. По существующим данным, пожары, возникающие в резервуарах, когда процесс горения занимает всю открытую поверхность жидкости, тушить существующей на сегодняшний день пожарной техникой чрезвычайно трудно.**

**В данной работе предлагается несколько технических решений, с помощью которых можно достаточно простым способом обеспечить пожарную безопасность значительной части общего числа емкостей и резервуаров, содержащих горючие жидкости.**

**И**зучению особенностей процесса горения жидкостей в ограниченных пространствах был посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ, результаты которых были обсуждены в статье "Устройства для предотвращения пожаров и тушения горящих жидкостей" опубликованной во втором номере журнала "Грани безопасности" за 2007 г. (стр. 20).

В этих работах были определены условия, при которых существование пламени вблизи поверхности жидкости становится невозможным, т.е. достигается эффект тушения. При этом изучалось горение жидкостей как в вертикальных каналах, так и в плоских, горизонтально расположенных газовых слоях, образованных параллельными плоскостями, не горящими в атмосфере воздуха. Было установлено, что наибольшая эффективность достигается в вертикальных каналах, имеющих осесимметрич-

ную форму в поперечном сечении (например, квадрат, шестиугольник, круг). Для практического применения исследовалась сборка вертикальных каналов, представляющая собой ячеистую структуру, внешне похожую на соты.

На данный момент, разработано несколько типов устройств для самотушения жидкостей различного назначения [1 - 4], которые, в наиболее простом варианте, могут быть применены для предотвращения и подавления пожаров в емкостях и резервуарах. Принцип работы этих устройств основан на подавлении естественной конвекции воздушной среды вблизи зоны пламени. Реализуются данные условия посредством конструкции устройства, параметры которой обоснованы и подтверждены теоретическими и экспериментальными разработками.

Ячеистая структура устройств изготавливается из листовой стали, толщина которой может варьироваться от 0,5 мм до нескольких миллиметров, в зависимости от назначения, эксплуатационных и конструктивных особенностей защищаемого оборудования.

На **рис. 1** приведена принципиальная схема, поясняющая динамику развития процесса тушения пламени в одном отдельно взятом вертикальном канале.

В начале процесса, когда жидкость практически полностью заполняет канал (положение А), наблюдается устойчивый турбулентный режим горения. Пламя расположено вблизи поверхности жидкости и имеет относительно большие размеры. В данном случае кислород воздуха свободно поступает со всех сторон в зону реакции (стрелками обозначено направление естественно-конвективных потоков), обеспечивая достаточно интенсивный режим горения. Одновременно под действием теплового излучения пламени происходит испарение жидкости с ее поверхности. Этим процессом лимитируется скорость выгорания жидкости.

По мере понижения уровня жидкости в вертикальном канале (положение Б), интенсивность процесса горения резко снижается. Происходит нарушение взаимосвязи между пламенем и поверхностью

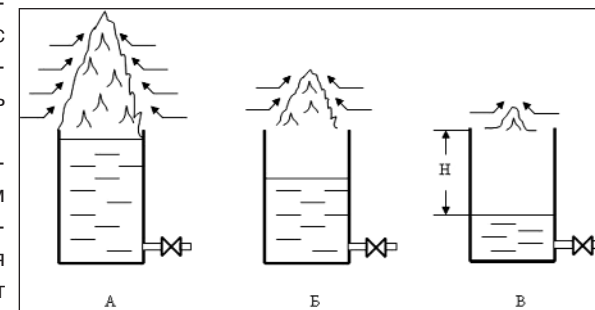


Рис. 1 Схема развития процесса тушения пламени в вертикальном канале

жидкости, поскольку оно не может существовать внутри вертикального канала из-за отсутствия окислителя, доступ которого устраняют его вертикальные стенки. Пламя уменьшается в размерах и происходит увеличение расстояния между зоной горения и жидкостью. В результате резко уменьшается тепловой поток, вызывающий испарение жидкости и, соответственно, интенсивность процесса горения существенно уменьшается. В этих условиях режим горения приобретает ламинарный характер.

Дальнейшее понижение уровня жидкости в вертикальном канале (положение В) создает условие, при котором пламя приобретает предельно малые размеры, процесс горения становится неустойчивым, пламя начинает пульсировать и при достижении уровня жидкости, равного  $H$  происходит потухание пламени.

Проведенные исследования показали, что высота  $H$  - верхняя часть сборки вертикальных каналов, незаполняемая жидкостью, при которой достигается эффект тушения пламени, зависит от ряда теплофизических параметров горючей жидкости. При этом, было установлено, что для легковоспламеняющихся жидкостей таких, например, как спирты, бензины, керосины различных марок, величина параметра существенно больше значений, характерных для горючих жидкостей, таких, как нефть, мазуты, масла, дизельные топлива и т.д., т.е. жидкостей имеющих более сложную молекулярную структуру и относительно высокую кинематическую вязкость.

На основании обработки большого числа экспериментальных данных получена зависимость, которую в самом общем виде можно представить в форме:

$$H = F(S, L, \nu, a, T, T_k), \quad (1)$$

где  $S$  - площадь поперечного сечения одного канала;

$L$  - удельная теплота испарения жидкости;

$\nu$  - кинематическая вязкость при нормальных условиях;

$a$  - температуропроводность при нормальных условиях;

$T, T_k$  - штатная температура жидкости и температура кипения соответственно.

Также было экспериментально установлено, что наибольшая эффективность тушения пламени в сборке вертикальных каналов практически для всех горючих жидкостей достигается при условии, когда:

$$H \geq 3d_{\text{экв.}}, \quad (2)$$

где  $d_{\text{экв.}} = 4S/P$  - эквивалентный диаметр одного канала;

$S$  - площадь поперечного сечения канала;

$P$  - его периметр.

Исключение составляет эфиры, для которых эффект тушения достигается при условии, когда  $H \geq 12d_{\text{экв.}}$ .

Максимальный размер  $d_{\text{экв.}}$ , который можно использовать при расчетах параметра  $H$ , не должен превышать 900 мм, поскольку для больших размеров экспериментальные данные отсутствуют.

Полученные данные о свойствах сборки вертикальных каналов, представляю-

щей собой ячеистую структуру, позволили разработать несколько эффективных способов предотвращения и тушения жидкостей, процесс горения которых протекает в газовой фазе.

В качестве примера рассмотрим возможные способы защиты от пожаров резервуара, в котором хранится дизельное топливо.

Размеры резервуара примем равными: высота 18 м, диаметр 30 м, т.е. объем дизтоплива составляет  $\sim 12700 \text{ м}^3$ .

### Способ предотвращения пожаров

Допустим, что в резервуаре уровень дизтоплива не меняется в течение длительного времени. В этом случае ячеистая структура вертикальных каналов может устанавливаться на поверхности жидкости. На рис. 2 показана схема распределения этой структуры.

Примем размер поперечного сечения одного канала равным (0,5x0,5) м.

Тогда  $d_{\text{экв.}} = 0,5$  м и, следовательно, согласно соотношению (2),  $H = 1,5$  м.

Размер  $h$  в данном случае с учетом температурных колебаний окружающей среды можно принять равным 0,2 м. Таким образом, полная высота слоя ячеистой структуры составит 1,7 м.

На рис. 3 показано расположение ячеистой структуры в резервуаре (вид сверху).

Необходимо отметить, что для больших диаметров резервуаров наиболее приемлемой формой сечения вертикальных каналов является квадрат.

По мнению авторов, это в значительной степени упрощает технологию сборки и монтажа всей системы самотушения. Кроме того, в данном варианте возможно применение наибольшего числа конструкторских решений.

Этот способ расположения устройства для самотушения жидкостей в емкостях и резервуарах полностью исключает возможность загорания жидкости даже при попытках ее зажечь, т.е. пожар на поверхности жидкос-

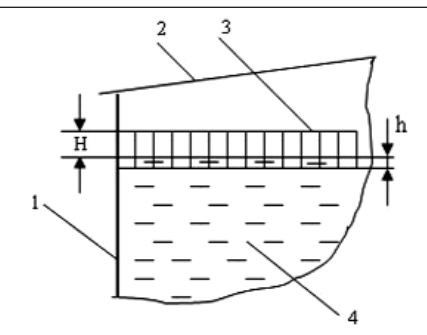


Рис. 2 Схема расположения ячеистой структуры в резервуаре с дизтопливом  
1 - стенка резервуара; 2 - крыша резервуара; 3 - ячеистая структура вертикальных каналов; 4 - дизтопливо; H - высота ячеистой структуры, находящейся над поверхностью жидкости; h - высота ячеистой структуры, находящейся под поверхностью жидкости

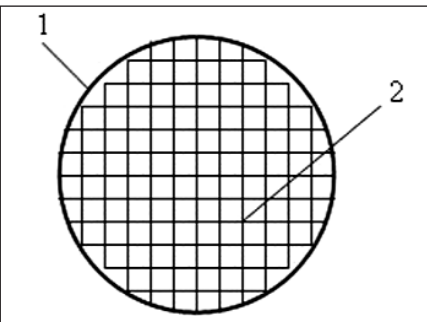


Рис. 3 Расположение ячеистой структуры в резервуаре (вид сверху)  
1 - вертикальная стенка резервуара;  
2 - вертикальные каналы ячеистой структуры

ти становится невозможным.

На многих предприятиях, связанных с механической обработкой металлов, например при изготовлении тонкой листовой стали или фольги, в подвальных помещениях размещаются открытые емкости, содержащие десятки тонн отработанного машинного масла. В случае возникновения пожара, загоревшееся масло тушить будет чрезвычайно трудно, поскольку такие пожары сопровождаются сильной задымленностью помещений и сложным расположением в них оборудования. В этих условиях рассмотренный способ предотвращения пожаров горючих жидкостей является наиболее приемлемым.

Здесь необходимо также отметить, что устройство самотушения (ячеистую структуру) можно устанавливать сверху и крепить в подвешенном состоянии, опустив в горючую жидкость и сохранив при этом высоту  $H$ .

Таким образом, рассмотренный выше способ, предотвращающий возможность возникновения загораний поверхности жидкости, может оказать существенную помощь в обеспечении пожарной безопасности объектов, содержащих горючие жидкости.

### Способ подавления пожаров

Способ подавления пожаров в емкостях и резервуарах рассмотрим на том же примере: в резервуаре, наполненном дизельным топливом, габаритные размеры которого приведены выше. В данном способе, устройство для самотушения устанавливается под поверхностью жидкости. Принципиальная схема расположения устройства показана на **рис. 4**.

На **рис. 5** приведена схема размещения всех элементов, необходимых для реализации данного способа тушения.

На схеме показано, что к нижней части вертикальной стенки резервуара, вблизи дна, проведен специальный трубопровод, предназначенный для аварийного слива жидкости. На трубопроводе устанавливается задвижка или запорный клапан, который в случае возникновения пожара, открывается с помощью электропривода или вручную и часть жидкости сливается в резервную емкость, находящуюся на безопасном расстоянии от горящего резервуара.

Очевидно, что воспламенение паровоздушной среды, образующейся в резервуаре над поверхностью жидкости, ведет ко всем разрушительным эффектам свойственным взрыву. При этом, в тех случаях, когда срывается крыша резервуара, возникает процесс горения всей открывшейся поверхности жид-

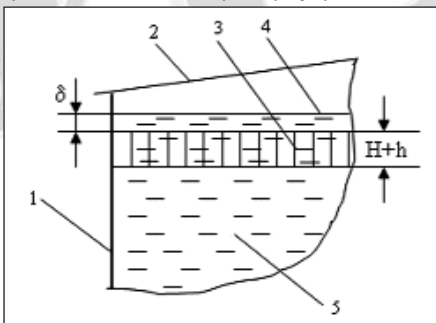


Рис. 4. Схема расположения устройства для самотушения под поверхностью дизельного топлива в резервуаре  
1 - стенка резервуара; 2 - крыша резервуара; 3 - ячеистая структура вертикальных каналов; 4 - поверхность дизтоплива; 5 - дизельное топливо

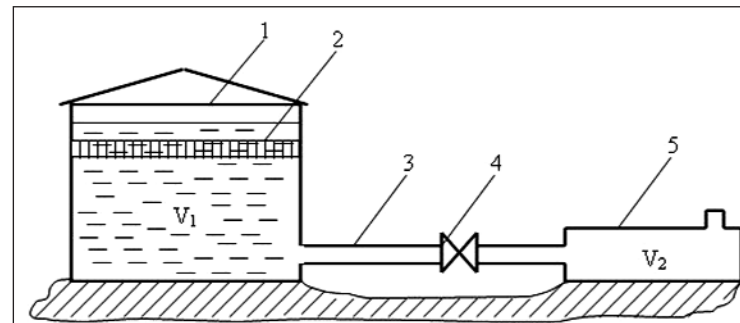


Рис. 5 Принципиальная схема способа тушения пожара в резервуаре  
1 - резервуар; 2 - ячеистая структура вертикальных каналов;  
3 - трубопровод аварийного слива жидкости; 4 - задвижка;  
5 - резервная емкость

мала. При возникновении кратковременного большого избыточного давления на поверхности жидкости, оно равномерно распределяется по всей поверхности ячеистой структуры вертикальных каналов. Это предохраняет устройство от повреждений. Следовательно, для того чтобы потушить пожар, при котором горит вся поверхность жидкости в резервуаре 1, необходимо открыть задвижку 4 и жидкость по трубопроводу 3 начнет сливаться в резервную емкость 5. Уровень горящей поверхности в резервуаре будет плавно перемещаться вниз и, проходя через ячеистую структуру вертикальных каналов 2, пламя будет быстро уменьшаться в размерах и при достижении уровня, равного  $H$  будет потушено. После этого задвижку 4 необходимо закрыть.

В рассматриваемом примере объем дизельного топлива в резервуаре  $V_1 \approx 12.700 \text{ м}^3$ . Отсюда, зная высоту вертикальных каналов, можно определить минимальный объем резервной емкости  $V_2$ , необходимый для приема слитой жидкости. Поскольку площадь поверхности жидкости в резервуаре равна  $\sim 706 \text{ м}^2$ ,  $H+h$  принята равной 1,7 м, высота слоя жидкости над ячеистой структурой равна 0,2 м, то для получения  $H = 1,5 \text{ м}$ , необходимо слить слой жидкости толщиной 1,7 м. В результате в резервную емкость должно слиться  $\sim 1200 \text{ м}^3$  дизельного топлива, т.е. около 10% от полного объема резервуара.

Необходимо также отметить, что если уменьшить эквивалентный диаметр вертикальных каналов в ячеистой структуре, например, в два раза, то в этом случае объем сливаемой жидкости в резервную емкость уменьшится примерно в два раза и составит  $\sim 600 \text{ м}^3$ . Соответственно уменьшится и время, необходимое для полной ликвидации процесса горения.

При ликвидации пожара, возникшего в резервуаре, важнейшую роль играет промежуток времени, отсчитываемый от момента возникновения пламени до полной его ликвидации. От него зависит размер ущерба, причиненного пожаром. Это время зависит от скорости истечения жидкости из отверстия и гидродинамического сопротивления трубопровода, предназначенных для аварийного слива, и, в первую очередь, от их диаметров.



Приближенно можно оценить это время для размеров резервуара с дизельным топливом, взятых в качестве примера, не учитывая при этом гидродинамическое сопротивление трубопровода.

Примем диаметр отверстия и соответственно трубопровода, расположенных в нижней части резервуара, равными 0,3 м. Кинематическая вязкость дизтоплива  $\nu \approx 22 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Высота начального уровня дизтоплива 18 м.

Для оценки используем формулу:

$$\tau = \frac{2 F_1 \cdot (\sqrt{H} - \sqrt{H^*})}{\mu \cdot F_2 \cdot \sqrt{2g}}, \quad (3)$$

где  $F_1$  - площадь горизонтального сечения резервуара;

$F_2$  - площадь отверстия вблизи дна резервуара;

$\mu$  - коэффициент расхода отверстия;

$H$  - начальный уровень жидкости в резервуаре;

$H^*$  - уровень жидкости, при котором происходит потухание пламени;

$g$  - ускорение свободного падения.

Коэффициент  $\mu$  определяется по данным работы [5] и зависит от числа Рейнольдса, вычисляемого по формуле

$$\text{Re} = \frac{F_2 \sqrt{2gH}}{\nu},$$

посредством которого учитывается кинематическая вязкость горючих жидкостей. В данном примере  $\text{Re} \approx 6,0 \times 10^4$ , что соответствует коэффициенту  $\mu = 0,62$ . Поскольку  $F_1 = 706 \text{ м}^2$ ,  $F_2 = 0,07 \text{ м}^2$ , то по формуле (3) можно определить время  $\tau$ , за которое осуществляется процесс тушения пламени. При данных параметрах  $\tau \approx 24,5 \text{ мин}$ .

Из формулы (3) следует, что время тушения в основном зависит от двух факторов: от диаметра отверстия для аварийного слива дизтоплива и параметра  $H^*$  - толщины слоя сливаемой жидкости, который в свою очередь зависит от принятого изначально размера  $d_{\text{экв}}$ . Так, например, если принять диаметр сливного отверстия равным 500 мм, то  $F_2 \approx 0,2 \text{ м}^2$ . При этом коэффициент  $\mu$  изменится незначительно. В этом случае время тушения составит  $\sim 8,6 \text{ мин}$ .

Если сравнить это время со временем, необходимым для ликвидации пожара в таком резервуаре обычными средствами тушения и всеми проблемами, которые возникают при этом, то становится очевидным преимущество рассмотренного способа тушения.

Полигонные испытания рассмотренного способа тушения пожаров в емкостях и резервуарах проводились в полигонных условиях. При этом использовалась емкость диаметром 3,0 м и высотой 1,7 м. Вертикальные каналы ячеистой структуры в сече-

нии имели форму квадрата. При этом  $d_{\text{экв}} = 100 \text{ мм}$ , высота 250 мм. Эта структура изготавливалась из листовой стали толщиной 0,6 мм. На рис. 6 приведена схема установки.

При проведении опытов емкость заполнялась водой до нижней поверхности ячеистой структуры. Затем, на поверхность воды наливалась горючая жидкость, состоящая из смеси отработанного машинного масла, трансформаторного масла, дизтоплива. При этом вследствие разности плотностей в верхней части емкости формировался слой горючей смеси толщиной  $Z \approx 300 \text{ мм}$ .

Такая схема наполнения емкости в большой степени снижает трудоемкость и стоимость проведения опытов, не снижая при этом достоверность получаемых результатов.

Для быстрого зажигания на поверхность горючей смеси добавлялось небольшое количество бензина. При достижении устойчивого режима горения по всей площади, сопровождаемого обильным дымовыделением, когда высота пламени достигала 5 ÷ 6 м, производился слив воды в приямок. Слой горячей смеси плавно опускался вниз, в структуру вертикальных каналов и начинался процесс самотушения жидкости (следует заметить, что это весьма впечатляющая картина). Пламя постепенно уменьшалось в размерах, снижалось дымовыделение, затем обнажалась ячеистая структура и через небольшой (несколько минут) промежуток времени пламя исчезало.

Следует отметить высокую эффективность и надежность тушения горящих жидкостей предлагаемым способом. На данный момент, провести опыты на емкостях большего диаметра не позволяли полигонные условия.

В заключение, необходимо предложить **еще один возможный способ тушения пожаров в емкостях и резервуарах**, который, при соответствующей конструкторской проработке, может существенно упростить процесс тушения пожаров. В данном способе, ячеистая структура вертикальных каналов размещается вблизи дна резервуара. При возникновении пожара, когда горит вся открытая поверхность жидкости, включается система, посредством которой осуществляется подъем устройств самотушения вертикально вверх. Способ подъема может быть любым, например, с помощью гидравлических систем или механических электроуправляемых подъемников. При прохождении горячей поверхности жидкости ячеистой структурой достигается эффект тушения пламени и полная ликвидация пожара.

В резервуарах, постоянно задействованных в процессе слива и наполнения нефтью или нефтепродуктами, когда достаточно часто изменяется уровень жидкос-

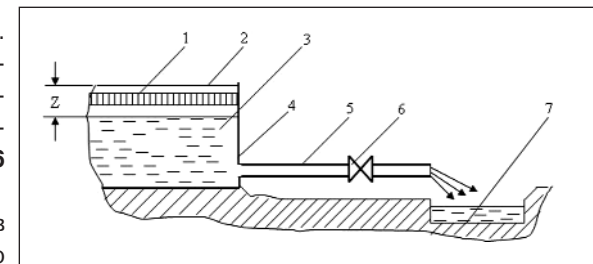


Рис. 6 Принципиальная схема установки

1 - ячеистая структура; 2 - поверхность горючей жидкости; 3 - вода; 4 - стенка емкости; 5 - трубопровод для слива воды; 6 - вентиль; 7 - приямок для слива воды

ти, возможно применение плавающего устройства для предотвращения пожаров. При этом поплавки, расположенные на периферии, вблизи стенок резервуара, должны удерживать ячеистую структуру вертикальных каналов, таким образом, чтобы при любом изменении уровня горючей жидкости, постоянно соблюдалась величина параметра  $H$ , т.е. высоты незаполняемой части вертикальных каналов, при которой воспламенение поверхности жидкости полностью исключается.



#### Литература:

1. Потякин В.И., Еремин В.И., Гребенек И.М. "Самотушение горящих при проливе жидкостей" в кн. "Пожарная техника". Сб. науч. трудов. М. ВНИИПО. 1988.
2. Авторское свидетельство СССР. №787046, кл. А62, С 3/12, 1980.
3. Потякин В.И., Еремин В.И., Гребенек И.М. "Устройства для самотушения горящих при проливе жидкостей". Пожарная техника. Расчеты проектирование. Сб. науч. трудов. М. ВНИИПО. 1989.
4. Патент на изобретение. №2252804, 2003г.
5. Рабинович Е.З. "Гидравлика". М. изд. "Недра", 1977 г.