



Устройство для самотушения горящих при проливах жидкостей

Методические рекомендации
по проектированию и применению

Специальное конструкторское бюро

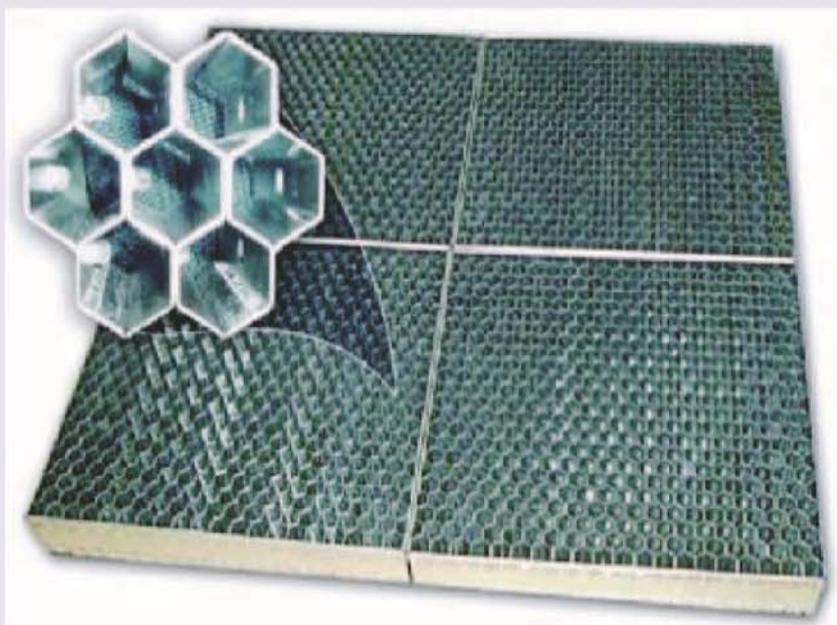
ТЕНЗОР



УП001



ББ02





Устройство для самотушения горящих при проливах жидкостей (УСП) – это новое, ранее не применявшееся надежное и высокоэффективное средство борьбы с аварийными проливами горящих жидкостей.

УСП обеспечивает как эффективное пожаротушение горящих жидкостей, так и предотвращение их загораний за счет подавления процесса газофазного горения. Конструкция обеспечивает полное самоподавление процесса горения при падении горящего потока жидкости и его прохождении внутри каналов устройства, а также надежную локализацию пролива и предотвращение разбрызгивания падающих горящих потоков жидкости. УСП является энергонезависимой системой, не требующей постоянного технического обслуживания, находящейся в постоянной готовности, срабатывание которой не зависит от исправности средств, обеспечивающих извещение о возникновении пожара. Процесс тушения с помощью УСП осуществляется без участия человека, не предусматривает применение традиционных средств и способов тушения горящих жидкостей, а также сводит к минимуму задымленность помещений.

В настоящее время на предприятиях применяют ряд конструктивных способов, частично ограничивающих развитие пожаров. Например, маслопроводы на АЭС проектируются из бесшовных труб с минимальным количеством фланцевых соединений. Фланцевые соединения закрываются специальными кожухами, препятствующими разбрызгиванию и разливу масла при нарушении герметичности. Маслопроводы отгораживаются от горячих источников защитными металлическими коробами. Под маслонаполненным оборудованием устанавливают поддоны, из

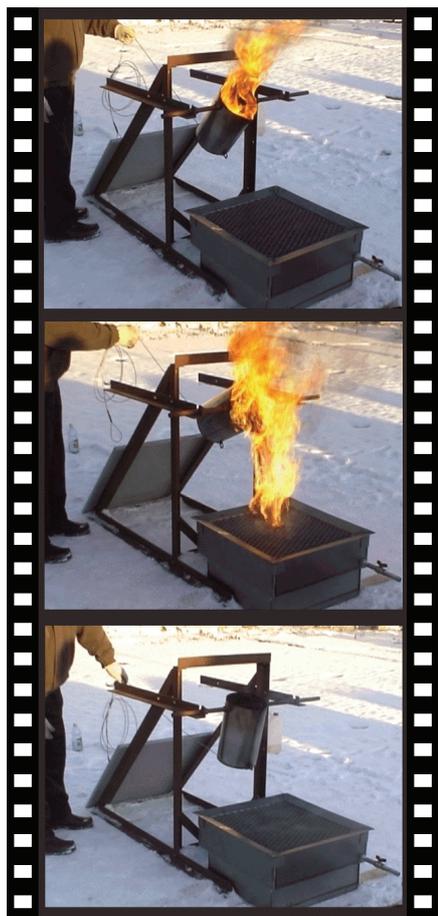
которых масло может стекать в резервную емкость. Также предусматривается и управляемый слив масла в аварийных ситуациях. Однако, подобные меры защиты не являются средствами тушения горящих при проливе жидкостей и полностью не решают проблемы обеспечения пожарной безопасности предприятий.

Процесс тушения пожаров, связанных с горением легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, является весьма сложной технической задачей. Это обусловлено большими скоростями распространения пламени по поверхности разлившейся жидкости, высокой интенсивностью процесса горения, большой задымленностью помещений и значительными размерами поверхности горения.

На основании исследований, проведенных СКБ «Тензор» совместно с ВНИИПО МЧС РФ, найдены новые технические решения, обеспечивающие надежную локализацию проливов горящих жидкостей и эффективное подавление пламени. Разработано несколько типов устройств самотушения горящих жидкостей, отличающихся друг от друга конструктивными решениями, обусловленными условиями практического их применения. Эффективность работы устройств подтверждена многочисленными экспериментами, проведенными во ВНИИПО МВД РФ, в которых использовались различные типы горючих жидкостей, получаемых на нефтеперерабатывающих предприятиях. Крупномасштабные испытания УСП, проведенные в полигонных условиях, подтвердили их способ-

ность эффективно работать в условиях длительного теплового воздействия от горящих потоков жидкостей. УСП имеют сертификат пожарной безопасности ССПБ.RU.ОП073.Н.00078.

В 2008 году УСП было удостоено премии «ЗУБР» и медали 1-й степени на конкурсе «Лучшие инновационные решения в области технологий безопасности – 2008».





Данное средство борьбы с пожарами должно найти широкое применение на предприятиях химической и нефтехимической промышленности, на морском, речном, железнодорожном и авиационном транспорте, атомных и тепловых электростанциях, на складах горюче-смазочных материалов, хранилищах жидких топлив, то есть на объектах с постоянным обращением легко воспламеняющихся и горючих жидкостей.

1. Физические принципы процесса тушения пламени и работы основных элементов УСП

Процесс свободного горения большинства жидкостей, являющихся продуктами нефтепереработки (углеводородные топлива, масла, мазуты и т.п.), протекает в газовой фазе - диффузионном режиме горения. В этом случае зона горения располагается на некотором расстоянии от горящей поверхности жидкости и существование пламени возможно только при вполне определенных внешних условиях, обеспечивающих этот процесс. Прежде всего необходимо наличие естественно-конвективных потоков воздушной среды, поставляющих в достаточном количестве окислитель в зону горения, а также наличие процесса испарения с поверхности жидкости, создаваемого излучением пламени и поставляющего горючее в зону горения. Эти физические процессы находятся в неразрывной взаимосвязи и если каким-либо способом нарушить эти условия существования пламени, то можно получить эффект потухания.

Прекратить процесс горения можно снижением концентрации кислорода в окружающей среде до предельных для процесса горения значений или снижением температуры горящей поверхности жидкости до значений, при которых резко уменьшается процесс испарения. Кроме того, подавление процесса горения может быть достигнуто за счет уменьшения интенсивности естественно-конвективных потоков воздуха, поставляющих окислитель в зону пламени.

Следует отметить, что все указанные выше факторы, при которых создаются условия для ликвидации процесса газофазного горения, характерны и для гетерогенного режима горения, т.е. беспламенного процесса, протекающего на поверхности вещества. Этот режим горения свойственен жидкометаллическим теплоносителям, изготавливаемым из металлов щелочной группы.



Во всех разработанных устройствах для самотушения горящих жидкостей используется принцип подавления естественной конвекции с помощью ряда конструктивных приемов, которые нарушают синергизм пламени, создавая условия для его отрыва от поверхности жидкости. Наилучшим образом эти условия достигаются в вертикальных каналах, имеющих в поперечном сечении осесимметричную форму (например, равносторонний треугольник, квадрат, шестигранник, круг и т.п.), а также в плоских газовых слоях, образованных двумя параллельными плоскостями, установленными на определенном расстоянии друг от друга. Этими плоскостями в УСП являются

металлические сетки, непроницаемые для естественно-конвективных потоков газовой среды.

Вертикальные каналы

Вертикальные каналы изготавливаются из листовой стали и в сборке они представляют собой ячеистую структуру, в которой реализуется эффект тушения пламени.



Для каждой сборки вертикальных каналов существует вполне определенная, критическая для процесса горения высота, которая не заполняется жидкостью, и если ее уровень располагается ниже этой высоты, то будет полностью исключена возможность горения жидкости во всех вертикальных каналах. При этом критическая высота незаполняемой части каналов функционально связана с их диаметром.

Для устройств самотушения, состоящих только из блоков вертикальных каналов, определены основные соотношения

$$\frac{H_{кр}}{d_{эк}} = K, \quad (1)$$

при которых происходит абсолютно надежное подавление процесса пламенного горения жидкостей. Здесь $H_{кр}$ – высота незаполняемой части каналов, $d_{эк}$ – эквивалентный диаметр одного канала

$$d_{эк} = \frac{4F}{P}, \quad (2)$$

где F – площадь поперечного сечения канала, P – периметр сечения.

Например, для жидкометаллических теплоносителей показатель K имеет достаточно большие значения ($K \geq 12$), поскольку предельная концентрация кислорода в газовой среде, обеспечивающая тушение горящего металла, составляет $3 \div 4\%$ по объему.

При проектировании УСП, состоящих из сборки вертикальных каналов, размещенных в открытых металлических емкостях с вертикальными боковыми стенками, следует пользоваться соотношением

$$\frac{H_{кр} \sqrt{L}}{\nu} = 0,74 \left(\frac{LS}{\nu^2} \right)^{0,42} \cdot \left(\frac{\nu}{\alpha} \right)^{0,28} \cdot \left(\frac{T_{к} - T}{T_{к}} \right)^{-2,12}. \quad (3)$$

Параметры, входящие в выражение (3), измеряются в следующих пределах:

$$3,2 \cdot 10^{10} \leq \frac{LS}{\nu^2} \leq 1,6 \cdot 10^{12};$$

$$0,32 \leq \frac{T_{к} - T}{T_{к}} \leq 0,95;$$

$$31,1 \leq \frac{\nu}{\alpha} \leq 300.$$

Здесь $H_{кр}$ – высота незаполняемой части вертикальных каналов,

L – удельная теплота испарения жидкости,

S – площадь поперечного сечения одного канала,

ν – кинематическая вязкость жидкости при нормальных условиях,

α – температуро-проводность жидкости при нормальных условиях,

$T_{к}, T$ – температура кипения и штатная температура жидкости.

Соотношение (3) следует применять в области малых значений $d_{эк}$ (от 10 до 40 мм).

В области больших значений $d_{эк}$ (от 40 до 900 мм) следует применять соотношение

$$\frac{H_{кр} \sqrt{L}}{\nu} = 0,15 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{LS}{\nu^2} \right)^{0,83} \cdot \left(\frac{\nu}{\alpha} \right)^{1,12} \cdot \left(\frac{T_{к} - T}{T_{к}} \right)^{-2,12}. \quad (4)$$



Параметры, входящие в выражение (4), изменяются в следующих пределах:

$$10^{12} \leq \frac{LS}{v^2} \leq 1,6 \cdot 10^{15};$$

$$0,32 \leq \frac{T_k - T}{T_k} \leq 0,95;$$

$$33,1 \leq \frac{V}{a} \leq 300;$$

Параметр $d_{эк}$ задается при расчете площади сечения канала $S = \frac{\pi d_{эк}^2}{4}$.

Соотношения (3) и (4) определены для легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, которые имеют значительные отличия по своим теплофизическим параметрам. Поэтому они применимы к любым жидкостям, характеристики которых укладываются в указанные пределы. Зная теплофизические параметры, входящие в соотношения (3) и (4), и задав $d_{эк}$, можно рассчитать $H_{кр}$.

При проектировании УСП можно использовать соотношение

$$H_{кр} \geq 3d_{эк} \quad (5)$$

которое работает при жестких условиях, когда температура горячей жидкости близка к температуре кипения и стенки вертикального канала разогреты до температуры $400 \div 500^\circ\text{C}$. Это особенно удобно в тех случаях, когда имеются неполные исходные теплофизические параметры жидкости, необходимые для расчетов. Но применение этого соотношения предполагает существенное увеличение металлоемкости устройства и его не следует применять для таких жидкостей, как эфиры и бензины с высоким октановым числом.

Соотношения (3) и (4) характерны для относительно вязких горючих жидкостей с высокой температурой кипения (до 400°C). Существующие результаты обработки и обобщения экспериментальных данных по определению $H_{кр}$ для горючих жидкостей с меньшей вязкостью здесь не представлены.

Необходимо также отметить, что в большинстве справочников отсутствует описание параметра L – теплоты испарения горючей жидкости, входящего в уравнения (3) и (4). Этот параметр можно определить по формуле

$$L = \left(\frac{9,5 \cdot \ln T_k - 0,007 T_k}{M} \right) \cdot T_k \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \right], \quad (6)$$

где M – молекулярный вес жидкости, T_k – температура кипения в гр. К.

Сеточные устройства

В качестве второго важнейшего элемента, входящего в конструкцию ряда УСП, применяются металлические сетки. При определенных геометрических параметрах они обладают уникальными свойствами. На течение жидкостей сетки практически не оказывают сопротивления и, в то же время, являются непроницаемой преградой для потоков естественной конвекции. Также металлические сетки способны устранять процесс разбрызгивания горячей струи жидкости и, одновременно, отсекают от нее пламя. Ранее эти свойства металлических сеток не использовались для подавления процесса диффузионного горения жидкостей.

При расчетах и проектировании УСП, в которых применяются металлические сетки, следует использовать графики, представленные на Рис.1 и Рис.2.



Зависимость, позволяющая подобрать оптимальные параметры металлических сеток, при которых обеспечивается надежное отсекаание пламени от жидкости, падающей в УСП, приведена на Рис.1.

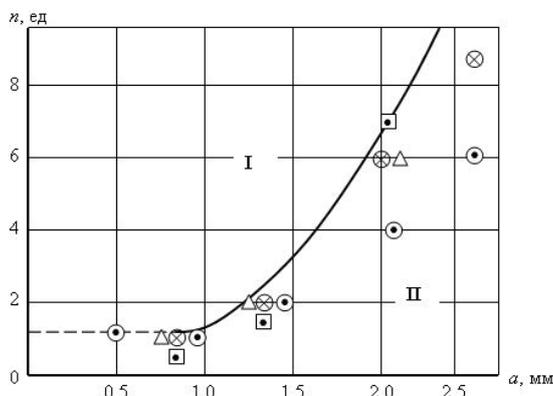


Рис.1. Зависимость минимального числа слоев сеток n от размера a одной ячейки в свету, характеризующая эффективность отсекаания пламени при падении струи

- – изопропилового спирта,
- ⊗ – керосина ТС-1,
- – дизельного топлива,
- △ – трансформаторного масла

Область I характеризует параметры сеток, при которых проскок пламени отсутствует, область II – область значений параметров, при которых проскок пламени будет иметь место. Определив по графику число слоев сеток в зависимости от a , при изготовлении пламяотсекающего слоя следует это число удвоить.

На Рис.2 приведены данные, которыми следует пользоваться при определении свойства сеток подавлять процесс горения жидкости, находящейся в емкости под этими сетками, т.е. определять параметры сеток, при которых отсекается поступление воздуха к пламени и реализуется тем самым процесс объемного тушения.

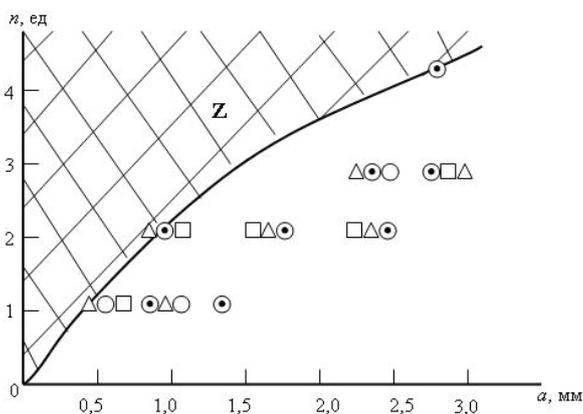


Рис.2. Зависимость минимального числа слоев сеток n от размера a одной ячейки в свету для

- – изопропилового спирта,
- ⊙ – керосина,
- △ – дизельного топлива,
- – трансформаторного масла;
- Z – область значений параметров, при которых процесс горения прекращается



Представленные зависимости $n(a)$ получены для легковоспламеняющихся и горючих жидкостей и могут применяться для любых жидкостей, кинематическая вязкость которых не выходит за пределы кинематической вязкости указанных на графиках жидкостей.

2. Устройства для самотушения жидкостей и варианты их практического применения

Все системы устройств самотушения, различные по высоте и площади занимаемой ими поверхности, устанавливаются строго горизонтально и изготавливаются в виде отдельных элементов, которые затем стыкуются в емкости в сплошную плоскую систему. Емкости, с установленными в них УСП, также могут стыковаться в целостную систему самотушения. При этом должна обеспечиваться возможность равномерного растекания жидкости по всем емкостям.

В тех же случаях, когда система самотушения применяется как средство предотвращения загораний, ее устанавливают непосредственно в производственных емкостях, наполненных горючей жидкостью.

Разработано всего три основных типа устройств самотушения (без учета модификаций), прошедших крупномасштабные полигонные испытания и показавших высокую эффективность тушения.

УСП-1 состоит только из ячеистой структуры вертикальных каналов без применения сеточных элементов. Основным назначением этого устройства является предотвращение загораний в открытых емкостях и баках, наполненных горючими жидкостями.

На Рис.3 показана принципиальная схема размещения этого УСП-1 в емкости.

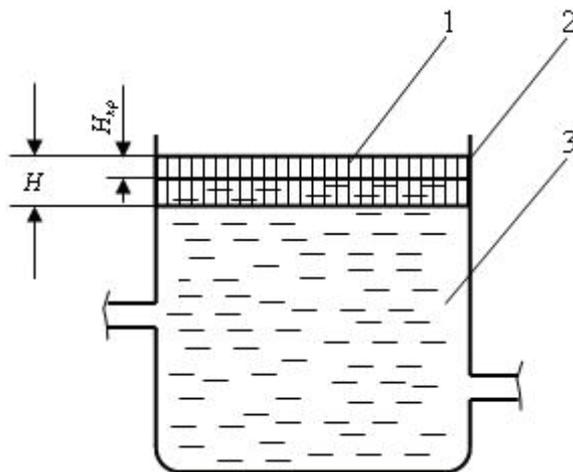


Рис.3. Схема размещения УСП-1 в емкости. 1 – вертикальная ячеистая структура каналов, 2 – стенки емкости, 3 – горючая жидкость

Если в производственном технологическом процессе уровень жидкости не изменяется, то, в этом случае, с помощью УСП-1 полностью исключается возможность поджога и загорания поверхности жидкости. Для расчета величины $H_{кр}$ следует применить соотношения (3) и (4), в зависимости от выбора значений $d_{жк}$. При этом общую высоту H следует принять равной $1,5 H_{кр}$.

Если уровень жидкости в емкости изменяется во времени в определенных относительно небольших пределах, то при определении общей высоты вертикальных каналов, к величине $1,5 H_{кр}$ следует прибавить максимальную высоту колебаний уровня жидкости.

При больших изменениях уровня жидкости значительно возрастает вертикальный размер УСП и, следовательно, его металлоемкость. В данном случае решается вопрос экономической целесообразности применения УСП. Вся структура вертикальных каналов изготавливается из



листовой стали любой марки. При этом можно использовать листы толщиной от 0,5 до 3,0 мм в зависимости от возможных нагрузок на поверхность УСП.

В резервуарах, постоянно задействованных в процессе слива и наполнения нефтью или нефтепродуктами, когда достаточно часто и сильно изменяется уровень жидкости, возможно применение плавающего варианта УСП.

УСП-2 состоит из ячеистой структуры вертикальных каналов и слоя металлических сеток, расположенных на верхней горизонтальной поверхности этой структуры. Основное назначение устройства – подавление пламени горячей жидкости, находящейся в баках, емкостях и резервуарах. При этом устройства самотушения устанавливаются в емкости под поверхностью жидкости. На Рис.4 приведена принципиальная схема конструкции устройства и его размещения в емкости.

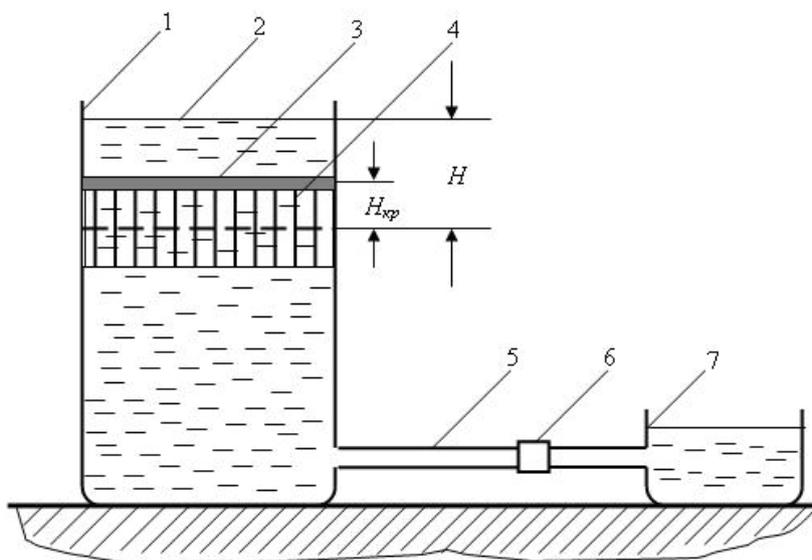


Рис. 4. Принципиальная схема конструкции и расположения УСП-2 в емкости.

- 1 – емкость, 2 – поверхность горючей жидкости, 3 – металлические сетки,
4 – вертикальные каналы, 5 – трубопровод, 6 – запорное устройство,
7 – резервная емкость

Принцип работы УСП-2 состоит в следующем. При возникновении пламени на поверхности жидкости 2 в емкости 1 открывается запорное устройство 6 и осуществляется частичный слив жидкости по трубопроводу 5 в резервную емкость 7. Горящая поверхность жидкости опускается вниз и проходит через УСП-2. В это время размеры пламени быстро уменьшаются, и при достижении уровня равного $H_{кр}$, процесс горения полностью прекращается. Эффект тушения пламени посредством УСП-2 достигается при условиях, когда $H_{кр} \approx d_{эк}$. На практике, при расчетах и проектировании устройств, следует пользоваться соотношением

$$\frac{H_{кр}}{d_{эк}} \approx 2. \quad (7)$$

Параметры металлических сеток, размещенных на верхней плоскости вертикальной ячеистой структуры, следует определять по графику, приведенному на Рис.2. Рассчитанные параметры сеток обеспечат объемное тушение пламени в каждом вертикальном канале. Для этого необходимо обеспечить плотное прилегание сеток к поверхности ячеистой структуры.



Требования к размещению УСП-2 и всех элементов системы, обеспечивающих ликвидацию процесса горения в емкости, заключаются в следующем. Устройство самотушения должно устанавливаться на небольшом расстоянии от поверхности жидкости, с учетом возможных колебаний уровня жидкости. Это позволит за короткий отрезок времени потушить пламя, поскольку при этом условии потребуются слив относительно небольшого количества жидкости. Если предполагается, что в аварийной ситуации возможно разрушение верхней части емкости или значительное изменение ее геометрической формы, то в этом случае в емкости следует устанавливать нижний дополнительный слой УСП-2, который гарантированно остановит процесс горения.

Также необходимо отметить, что установка нескольких ярусов УСП-2 существенно повышает прочность боковых вертикальных стенок емкости и снижает вероятность ее разрушения.

При проектировании всей системы пожаротушения необходимо рассчитать время тушения, которое будет зависеть от количества жидкости, сливаемой в резервную емкость, для того, чтобы ее уровень достиг первого или, например, второго яруса УСП-2. Длительность слива будет зависеть, в основном, от диаметра трубопровода для слива его длины и уровня расположения резервной емкости. Длина трубопровода должна обеспечить минимальное воздействие излучения пламени на вспомогательные элементы системы тушения.

УСП-3 состоит из ячеистой структуры вертикальных каналов и нескольких слоев металлических сеток, расположенных в плоскости нижнего среза этой структуры. Этот тип устройства самотушения предназначен для ликвидации процесса горения падающих потоков жидкости, образующихся в аварийных ситуациях. УСП-3 обладает наиболее универсальными свойствами тушения горящих жидкостей и более широким диапазоном применения по сравнению с УСП-1 и УСП-2. Кроме того, конструкция устройства позволяет существенно снизить металлоемкость системы.

На Рис.5 приведена принципиальная схема конструкции устройства и показано его поперечное сечение. УСП-3 размещается в открытой металлической емкости 1 и состоит из двух основных элементов: горизонтального слоя осесимметричных вертикально расположенных каналов 2, образующих ячеистую структуру, и слоя, образованного металлическими сетками, плотно прилегающего к нижней части ячеистой структуры вертикальных каналов. Слои сеток 3 и 4 должны быть расположены таким образом, чтобы между ними образовался плоский газовый слой толщиной $h \leq 10$ мм.

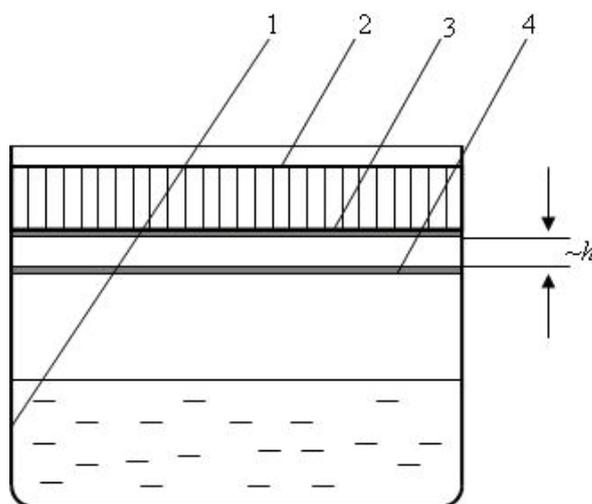


Рис.5. Принципиальная схема конструкции и расположения УСТ-3 в емкости.

1 – емкость, 2 – вертикальные каналы, 3 – верхний слой сеток,
4 – нижний слой сеток

При проектировании и расчетах УСП-3 можно применить формулу (5). В этом случае, сборка вертикальных каналов обладает наибольшей эффективностью тушения пламени и практически не зависит от рода жидкости, но, при этом, возрастает металлоемкость конструкции.



При использовании соотношений (3) и (4) металлоемкость устройства существенно уменьшается, поскольку уменьшается $H_{кр}$ – высота вертикальных каналов, незаполняемая жидкостью.

Функциональное назначение сеток в УСП-3 заключается в следующем. Верхний слой сеток 3 (см. Рис.5) обеспечивает надежное отсекаание пламени от жидкости, падающей в устройство самотушения, а нижний слой сеток 4 предотвращает поступление воздуха к пламени, реализуя тем самым эффект объемного тушения.

При конструировании и подборе сеточных элементов для УСП-3 следует пользоваться графиками, представленными на Рис.1 и Рис.2, которые позволяют подобрать минимальное число сеток n , в зависимости от размера a одной ячейки сетки в свету (т.е. в зависимости от параметров сеток, имеющих на предприятии-изготовителе). Определив число слоев сеток в зависимости от a , при изготовлении пламеотсекающего слоя необходимо это число удвоить для тех сеток, которые плотно прилегают к нижней части вертикальных каналов.

Свойства сеток

Правильно подобранные металлические сетки резко снижают проникновение паровой фазы жидкости из емкости в окружающую атмосферу. Они обладают низкой интегральной теплопроводностью и малой тепловой инерционностью, поэтому даже в условиях длительного воздействия пламени горячей струи максимально локализуется зона горения.

Плоский газовый слой, образованный верхним и нижним (см. Рис.5) слоями сеток, является необходимым элементом в конструкции УСП-3, подавляющим процесс горения жидкости. Этот слой является эффективным тепловым сопротивлением, предотвращающим нагревание паровоздушной среды, находящейся над поверхностью жидкости, поскольку при $h \leq 10$ мм в слое осуществляется процесс теплообмена, близкий к кондуктивному [1]. При указанной величине h в газовом слое в воздушной среде (21% O_2 по объему) процесс горения невозможен даже при небольшом размере единичного очага горения.

УСП-3 имеет несколько вариантов применения.

1. Металлическая открытая емкость с установленным в ней УСП-3 может размещаться в специальном приемке для приема стекающей по полам горячей жидкости при ее аварийном разливе.

2. УСП-3 может быть установлено непосредственно в открытых баках и относительно небольших резервуарах под слоем горючей жидкости. В случае ее загорания процесс тушения будет достигнут посредством слива жидкости из нижней части емкости. При прохождении горящего уровня через устройство самотушения будет реализовано эффективное подавление пламени.

3. Конструкцию УСП-3 следует применять для приема и тушения вертикально падающих горящих потоков жидкости малых и больших расходов. В этих устройствах пламя отсекается, а потушенная жидкость может либо оставаться в емкости, либо сливаться в специальную резервную емкость. В последнем случае, можно применять емкости с устройством самотушения относительно небольших размеров.

4. Конструкция устройства самотушения может быть выполнена в виде горизонтальных пламегасящих полов. При этом полы рассчитываются на прием всей жидкости, находящейся в обращении.

Высота полов складывается из высоты плоского горизонтально расположенного газового слоя $h \approx 10 \div 12$ мм, образованного металлическими сетками, зазора между нижним слоем сеток и полом помещения, равного, например, $10 \div 15$ мм (при толщине днища емкости $2 \div 3$ мм), и высоты вертикальных каналов, определяемой соотношением (5). Если принять $d_{эк} = 20$ мм, то общая высота полов будет составлять ~ 100 мм.

УСП-3 можно составлять из отдельных блоков одинакового размера и формировать из них пламегасящие полы.



Плоские формы устройств самотушения (пламегасящие полы) также составляются по аналогичной схеме из отдельных блоков, которые плотно подсоединяются друг к другу в специальном поддоне с вертикальными боковыми стенками, образуя сплошную ячеистую структуру. При этом возрастают прочностные характеристики устройств и обеспечивается возможность установки и перемещения оборудования по поверхности полов.

В настоящее время ОАО «Приборный завод «Тензор» разработало еще несколько вариантов УСП [2, 3]. Проведенные огневые испытания показали высокую эффективность тушения горящих жидкостей этими устройствами.

3. Основные, наиболее вероятные условия горения жидкостей в аварийных ситуациях

Статистический анализ пожаров, имевших место на отечественных и зарубежных АЭС, позволил выявить наиболее опасные участки, в которых чаще всего возникают и развиваются пожары. Это главные циркуляционные насосы, дизельные генераторы, трансформаторы, турбогенераторы. Значительная часть этого оборудования содержит или снабжается большим количеством легковоспламеняющихся и горючих жидкостей. Во вспомогательных помещениях АЭС в большом количестве содержится дизельное топливо, турбинное масло, трансформаторное масло. Это создает постоянную угрозу возникновения пожаров.

Но при всем многообразии указанного оборудования можно выделить три основных случая или варианта горения жидкостей, приводящих к сложным пожарам, ликвидировать которые чрезвычайно трудно.

1. Горение жидкости, возникшее в различного рода емкостях стационарно открытых, а также горение в закрытых емкостях, возникшее при воспламенении паров жидкости и срыве крышки.

2. Горение жидкости, разлитой при аварии на поверхность полов помещений, сопровождающееся высокой температурой пламени и большой скоростью распространения пожара.

3. Горение потоков жидкости, падающих и стекающих в виде горящих струй, например, из баков или емкостей, расположенных на несколько метров выше уровня полов. При этом могут иметь место два варианта истечения жидкости:

а) горящая жидкость стекает под действием собственного веса, т.е. в этом случае оборудование в штатном режиме работает при давлении, близком к атмосферному;

б) горящая жидкость вытекает из оборудования, находящегося под давлением в несколько атмосфер, например, из маслопроводов.

Процесс истечения горючей жидкости, указанный в пункте б), также следует разбить на три основных режима:

– разрыв трубопровода, при этом струя жидкости соответствует диаметру трубы;

– щель в узлах стыковки трубопроводов, эффективный диаметр которой создает тонкую компактную струю жидкости;

– щель в узлах стыковки трубопроводов, размер которой создает эффект распыления, образуется тонкодисперсный факел распыленной жидкости.

Для предотвращения и тушения пожаров, которые можно отнести к первому варианту горения жидкостей, рекомендуется использовать УСП-1. При этом предотвращение загораний в высоковольтных масляных трансформаторах обеспечивается также этим устройством с выполнением всех правил его расчета и размещения. В этом случае, для изготовления вертикальной ячеистой структуры можно применять стеклотекстолиты, обладающие высоким пределом горения по концентрации кислорода в воздушной среде (так, например, горение стеклотекстолита СТАП-2-35 возможно только в азотно-кислородной среде с содержанием кислорода превышающим 40% по объему).



Для тушения пожаров жидкостей, процесс горения которых протекает по варианту, изложенному во втором пункте, следует применить УСП-2. При этом также необходимо соблюдать правила расчета и размещения устройств самотушения.

Ликвидация процессов горения жидкостей, различные режимы истечения которых рассмотрены в п.3, реализуется посредством применения УСП-3. В варианте а) этого пункта следует оценить максимальное удаление падающей струи горячей жидкости от вертикальных стенок емкости, которое будет зависеть от размещения днища емкости относительно пола, вязкости и высоты столба жидкости, находящейся в емкости. Размещать устройства самотушения следует с учетом этого расстояния.

В варианте б) п.3 ликвидация пожароопасных и взрывоопасных ситуаций, связанных с особенностями указанных режимов истечений, также должна осуществляться с помощью УСП-3. При этом необходимо применить специальные кожухи, конструкция которых позволяет преобразовать тонкораспыленную жидкость в сплошную среду и обеспечить ее направленный слив в устройство самотушения.

На Рис. 6 показана принципиальная схема системы обеспечения пожарной безопасности применительно к пункту б) п.3.

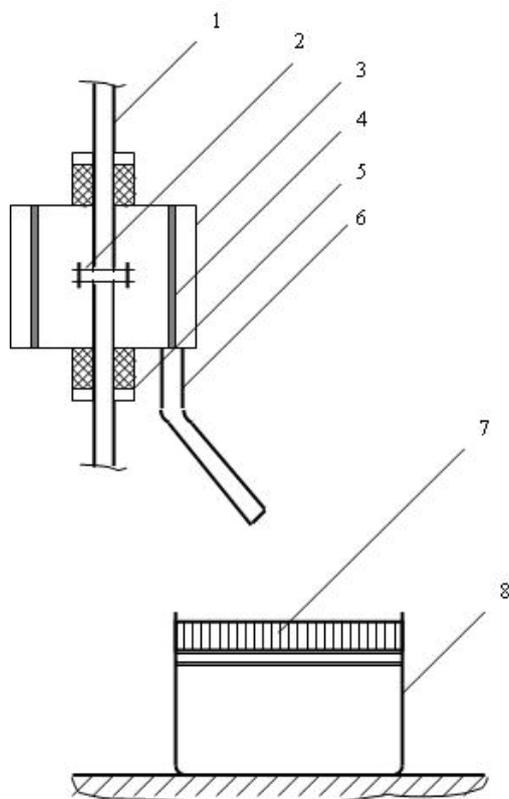


Рис.6. Принципиальная схема системы обеспечения пожарной безопасности узлов стыковки трубопроводов.

- 1 – трубопровод, 2 – узел стыковки трубопроводов, 3 – корпус кожуха,
4 – металлические сетки, 5 – резиновый уплотнитель, 6 – сливной патрубок,
7 – УСП-3, 8 – емкость

Кожухи изготавливаются из листовой стали, марка которой определяется условиями эксплуатации защищаемой технологической системы. К внутренним поверхностям кожуха крепятся металлические сетки с размером ячейки в свету $0,5 \div 0,6$ мм. Сетки полностью преобразуют мелкодисперсный газожидкостной факел в однородную жидкость, которая плавно вытекает через сливной патрубок в емкость с устройством для самотушения жидкости. Вместе с этим, дан-



ная конструкция защитного кожуха предотвращает разбиение сильной компактной струи и образование мелких капель горючей жидкости. Кроме того, эпизодическое визуальное наблюдение за сливным патрубком позволяет определять состояние стыковочных узлов трубопроводов. Диаметр сливного патрубка должен быть равен диаметру трубопроводов. Размеры и форма кожухов должны соответствовать размерам и конфигурации защищаемого стыковочного узла.

При проектировании системы защиты узлов стыковки трубопроводов следует определить какое количество горючей жидкости может вылиться в данном соединении трубопроводов при аварии и, в соответствии с этим, рассчитать размеры емкости и размеры устройства самотушения.

4. Максимальные проектные аварии

Создание систем самотушения горящих жидкостей для ситуации, которая может возникнуть при гипотетической аварии, является наиболее сложной и практически невыполнимой задачей. Подобного рода задачи наилучшим образом решаются на стадии проектирования технологических систем. Свести к минимуму разрушительные последствия проектируемой аварии и возникшего при этом пожара можно только с помощью устройств самотушения, других средств и способов просто не существует.

Рассмотрим пример максимальной проектной аварии. Допустим, что произошло полное разрушение маслобака, содержащего несколько тонн масла, и все это количество горячей жидкости разлилось по полам помещения, т.е. практически мгновенно возник мощный пожар наивысшей сложности тушения. Последствия такого пожара предсказать трудно. Быстро потушить разлившееся и горящее масло практически невозможно даже при использовании всех имеющихся в этом помещении средств тушения пожара. Если предположить, что автоматические системы пожаротушения также подверглись повреждению (что вполне возможно) и своевременно не сработали, то возникает катастрофическая ситуация.

Практические рекомендации по решению указанной выше проблемы состоят в следующем:

– емкость, с установленным в ней УСП-3, следует разместить в бетонном приянке, как показано на Рис.7.;

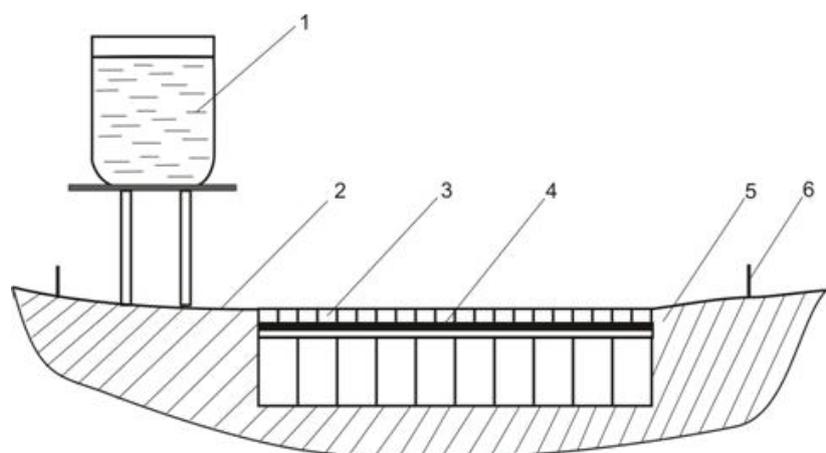


Рис.7. Схема размещения УСП-3, рассчитанная на ликвидацию пожара при максимальной проектной аварии.

- 1 – маслобак, 2 – наклонные полы, 3 – устройство самотушения масла УСП-3,
- 4 – металлическая емкость, 5 – бетонный профиль фундамента,
- 6 – металлическое ограждение



- объем ее должен быть рассчитан на прием всего количества масла, находящегося в баке;
- при расчете параметров УСП-3, следует в 2-3 раза увеличить высоту всей структуры вертикальных каналов, что придаст повышенную прочность всей системе тушения;
- в качестве дополнительного предохранения устройства самотушения от повреждений, можно установить прочную стальную решетку над поверхностью вертикальных каналов. Это дополнение не повлияет на эффективность тушения;
- под емкостью, с горючей жидкостью, должен быть обеспечен круговой уклон к приямку с размещенной в нем емкостью с УСП-3, а по периметру уклона должно иметься ограждение, предотвращающее возможное растекание жидкости;
- покрытие уклона необходимо изготовить из материала, который не горит в атмосфере воздуха;
- длительность горения слоя масла, оставшегося на наклонных полах после аварийного слива основной массы жидкости в устройство самотушения, можно оценить, используя следующие соотношения:

$$F_0 = 42,9 \cdot 10^3 \cdot Ga^{-0,8} \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^{-0,5};$$

$$12 \cdot 10^{10} \leq Ga \leq 28,3 \cdot 10^{12};$$

$$0,02 \leq \frac{h}{l} \leq 0,06.$$

Необходимо отметить, что в огневых испытаниях наклонных полов параметр l не превышал 4 м, а угол наклона изменялся в пределах от 1 до 3,4°. В левой части уравнения число Фурье $F_0 = \frac{\nu\tau}{l^2}$ является мерой отношения вязкостных сил и размеров поверхности стекания

жидкости, ν – кинематическая вязкость жидкости, τ – время горения жидкости после окончания пролива, l – длина наклонной плоскости полов. В правой части уравнения критерий Галилея

$Ga = \frac{gl^3}{\nu^2}$ характеризует подобие полей свободного течения жидкости, где g – ускорение сво-

бодного падения. Уклон полов определяется соотношением: $\frac{h}{l}$, где h – высота подъема полов относительно верхней горизонтальной плоскости вертикальной структуры каналов УСП-3.

Для данной системы защиты от пожаров, которые могут возникать при полном разрушении емкостей, наполненных горючими жидкостями, площадь поверхности ячеистой структуры вертикальных каналов в первом приближении можно принять равной площади поверхности жидкости, которая имеет место в рабочем состоянии емкости.

При проектировании оборудования, следует учитывать тот факт, что емкость с горючей жидкостью, размещенная в специальном углублении бетонных полов помещения, представляет собой наименьшую пожарную опасность в любых аварийных ситуациях. Это обусловлено тем, что ее вертикальные стенки меньше всего будут подвержены разрушению и, в этом случае, полностью исключается разлив жидкости на большие площади по полам помещения, а, следовательно, и упрощается процесс ликвидации загораний. Дополнительная установка перекачивающих насосов и трубопроводов в этом случае представляет собой гораздо меньшую пожарную опасность, т.к. в них содержится небольшое количество горючей жидкости.

5. Основные требования к конструированию и монтажу УСП

Основные требования, которые необходимо строго соблюдать при изготовлении устройств самотушения состоят в следующем.



а) УСП изготавливаются главным образом из листовой стали. Марки стали определяются в зависимости от условий, в которых будут эксплуатироваться эти устройства. Так, например, для АЭС, в которых теплообменники работают на жидкометаллических теплоносителях, для изготовления УСП следует использовать марки нержавеющей стали.

– Устройства самотушения и емкости, в которых они устанавливаются, не должны подвергаться коррозии. Поэтому, в ряде случаев, металл следует подвергнуть гальванической обработке.

– Верхняя и нижняя поверхности ячеистой структуры должны быть абсолютно плоскими и не должны иметь неровностей и выступов.

– УСП должны располагаться в емкости строго горизонтально. Стенки емкости и стенки каналов, образующих ячеистую структуру, устанавливаются вертикально.

– Каждый канал ячеистой структуры в сечении должен иметь осесимметричную форму. Например, это может быть правильный треугольник, квадрат, правильный шестигранник и т.п.

– Толщина листовой стали, из которой изготавливается ячеистая структура вертикальных каналов, определяется требованиями прочности к конструкции УСП. Если устройство не несет никакой механической нагрузки, кроме давления жидкости на стенки емкости (при ее аварийном заполнении), то в этом случае допускается применение листовой стали толщиной 0,5 – 0,8 мм. При этом толщину стенок емкости следует рассчитать.

Если УСП используется в условиях, когда по ячеистой структуре вертикальных каналов должна свободно перемещаться какая-то техника или оборудование, то в данном случае устройство самотушения должно обладать высокими прочностными характеристиками и толщина листовой стали для изготовления ячеистой структуры может находиться в пределах от 2,0 до 5,0 мм.

б) Требования к сборке и стыковке всех элементов УСП.

Устройства самотушения жидкостей, как отмечалось ранее, работают на принципе подавления естественной конвекции. Это накладывает достаточно жесткие условия на процесс их изготовления и сборки.

– Допустимые размеры зазоров при сборке вертикальных каналов не должны превышать $0,3 \div 0,4$ мм. Этот размер обеспечивает полную изоляцию от потоков естественной конвекции, возникающих при горении жидкости.

– Допустимые размеры зазоров между емкостью и УСП, установленным в ней, также не должны превышать $0,3 \div 0,4$ мм.

– Все места стыковки отдельных элементов системы самотушения, обеспечивающие протекание жидкости от одного элемента к другому, можно уплотнять стяжкой гладких металлических поверхностей без применения каких-либо уплотнительных прокладок.

– Сеточные элементы, входящие в конструкцию, например, УСП-3, должны плотно прилегать к нижней горизонтальной поверхности ячеистой структуры. Выполнение этого требования позволяет получить практически мгновенный эффект тушения горячей струи падающей жидкости. Это требование должно выполняться и при расположении сеток на верхней горизонтальной поверхности ячеистой структуры.

При проектировании и изготовлении УСП должны строго выполняться условия, предотвращающие проникновение потоков естественной конвекции в емкость с горючей жидкостью.

6. Техническое обслуживание УСП в процессе эксплуатации

Устройства самотушения жидкостей, установленные в помещениях, имеющих повышенную пожарную опасность, не требуют сложного технического обслуживания. Их рабочее состояние – постоянная готовность к тушению пламени, стабильно во времени. Необходимо лишь через определенные промежутки времени (в зависимости от условий эксплуатации и чистоты помещений) проверять нет ли засорений ячеистой структуры и не повреждены ли по каким-то



причинам элементы ячеистой структуры. Необходимо также эпизодически проверять сеточные устройства и степень их засоренности, если это может иметь место. Все сеточные элементы следует поддерживать в чистоте, поскольку это влияет на скорость подавления пламени.

Заключение

Методические рекомендации по применению и конструированию устройств для самотушения горящих жидкостей составлены на основании разработок СКБ «Тензор» и ВНИИПО МЧС РФ. Приведены все необходимые сведения для проектирования и изготовления систем пассивной защиты от пожаров горючих жидкостей, определены основные возможности УСП, даны варианты размещения УСП в помещениях, представляющих повышенную пожарную опасность.

Приведенные методические указания позволяют рассчитывать и конструировать УСП любого назначения как для предотвращения загораний, так и для тушения горящих жидкостей.

Более конкретные методические рекомендации и указания могут быть даны лишь при наличии конкретной постановки задачи по обеспечению пожарной безопасности того или иного объекта. Для этого необходимо иметь все данные о расположении объекта в помещении, о количестве и типе горючей жидкости, находящейся в нем и т.п.





Примеры расчетов и конструкторских решений при проектировании устройств самотушения

В первую очередь рассмотрим пассивную систему защиты от пожаров помещений, в которых содержится относительно большое количество горючей жидкости, например, несколько тонн машинного масла или дизельного топлива. Аварийный разлив такого количества горячей жидкости по полам помещения создает, как отмечалось ранее, сложнейшие для тушения пожаров условия.

Чтобы исключить подобного рода пожары, необходимо определить, какую площадь должны занимать устройства самотушения, определить их суммарный объем для приема всей горячей жидкости и, соответственно, оптимальную высоту ячеистой структуры.

При проектировании систем самотушения следует учитывать два основных режима эксплуатации горючих жидкостей. Первый, – когда емкость или бак с горючей жидкостью находится при атмосферном давлении, и второй, – когда эта жидкость находится под давлением в несколько атмосфер. Указанные режимы содержания горючих жидкостей создают существенные различия в способах размещения устройств самотушения. Рассмотрим эти режимы.

1. Горючая жидкость находится в емкости при атмосферном давлении

В производственных помещениях возможны различные варианты установки емкостей, наполненных горючими жидкостями. При этом расстояние между днищем емкости и поверхностью пола во многом определяет общую площадь поверхности устройств самотушения, которые следует размещать под емкостью или рядом с ней.

Для решения этого вопроса необходимо рассмотреть некоторые основные положения теории истечения жидкости через отверстия в атмосферу. Образование этих отверстий возможно в аварийных условиях. Они могут возникнуть в любом месте металлического корпуса и иметь различные размеры и форму. Истечение жидкости через эти отверстия может происходить как при постоянном напоре перед отверстием, так и при переменном.

Рассмотрим истечение жидкости через малое отверстие в тонкой боковой стенке резервуара (Рис.1) при постоянном уровне $H^* = \text{const}$, т.е. режим, когда жидкость истекает струей с установившимся движением. Следует отметить, что малым называют отверстие, диаметр или вертикальный размер которого значительно меньше (в 10 раз и более) напора перед отверстием, что позволяет считать давление во всех точках этого отверстия практически постоянным. С гидравлической точки зрения, стенка считается тонкой, если вытекающая струя соприкасается лишь с кромкой отверстия и не касается боковой поверхности. Это имеет место при толщине стенки $\delta < (2 \div 2,5) d_o$, где d_o – диаметр отверстия.

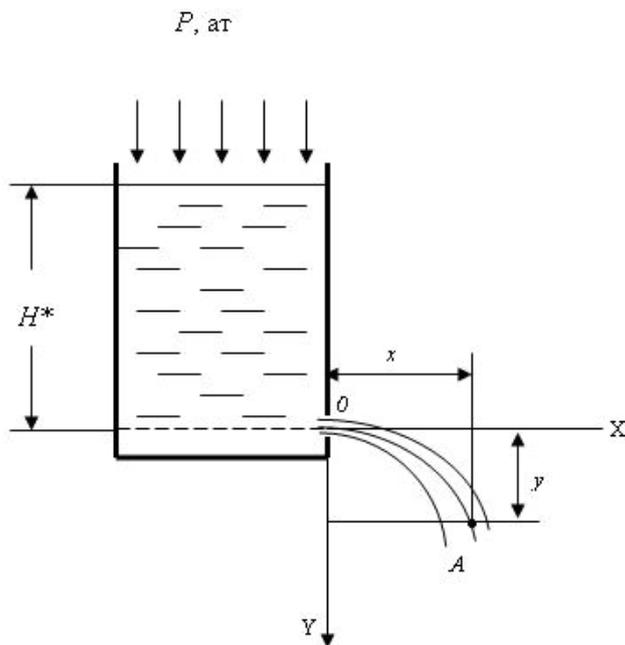


Рис.1. Схема расположения отверстия в емкости и вытекающей из него струи. Точка O – центр «тяжести» отверстия, A – точка траектории струи

Траектория вытекающей из бокового отверстия струи жидкости (сопротивление воздуха не учитывается) близка по своей форме к параболе, координаты любой точки оси которой определяются уравнениями:

$$x = V\tau; y = \frac{g\tau^2}{2}, \quad (1)$$

где V – скорость истечения жидкости из отверстия, g – ускорение свободного падения, τ – время.

Решая эти уравнения совместно, исключив из них τ , получим уравнение траектории частиц жидкости, т.е. искомое уравнение параболы истечения

$$y = \frac{gx^2}{2V^2}. \quad (2)$$

Здесь координата x характеризует дальность полета струи. Для вычисления траектории параболы истечения, требуется определить V – действительную скорость стечения жидкости из отверстия, которая зависит не только от значения напора H^* , но также от плотности и динамической вязкости этой жидкости. Поэтому для определения скорости истечения жидкости из отверстия следует использовать следующую формулу

$$V = \varphi\sqrt{2gH^*}. \quad (3)$$

Здесь φ – коэффициент скорости является кинематической характеристикой жидкости, т.е. функцией числа Рейнольдса $\varphi = f(Re)$, где

$$Re = \frac{d\sqrt{2gH^*}}{\nu}. \quad (4)$$



На Рис.2 представлен график зависимости $\varphi = f(Re)$, необходимый для определения скорости истечения. Кроме зависимости $\varphi(Re)$ на Рис.2 приведены также зависимости $\mu(Re)$ и $\varepsilon(Re)$, необходимые для расчетов характеристик процессов истечения.

При построении указанных зависимостей использовались данные многих авторов [4 — 8], а также результаты многочисленных опытов, проведенных над свободным истечением воды, глицерина, различных масел, нефти и других жидкостей. Опытные данные охватывают широкий диапазон изменения числа Рейнольдса, от $Re = 10$ до $Re = 1 \cdot 10^6$. Кинематическая вязкость жидкостей изменялась от $\nu = 0,01$ до $\nu = 10 \text{ см}^2/\text{с}$, диаметры отверстий от $d = 0,5$ до $d = 30 \text{ см}$.

На основании выше приведенных данных можно рассчитывать все необходимые при проектировании параметры устройств самотушения горящих в аварийных ситуациях жидкостей.

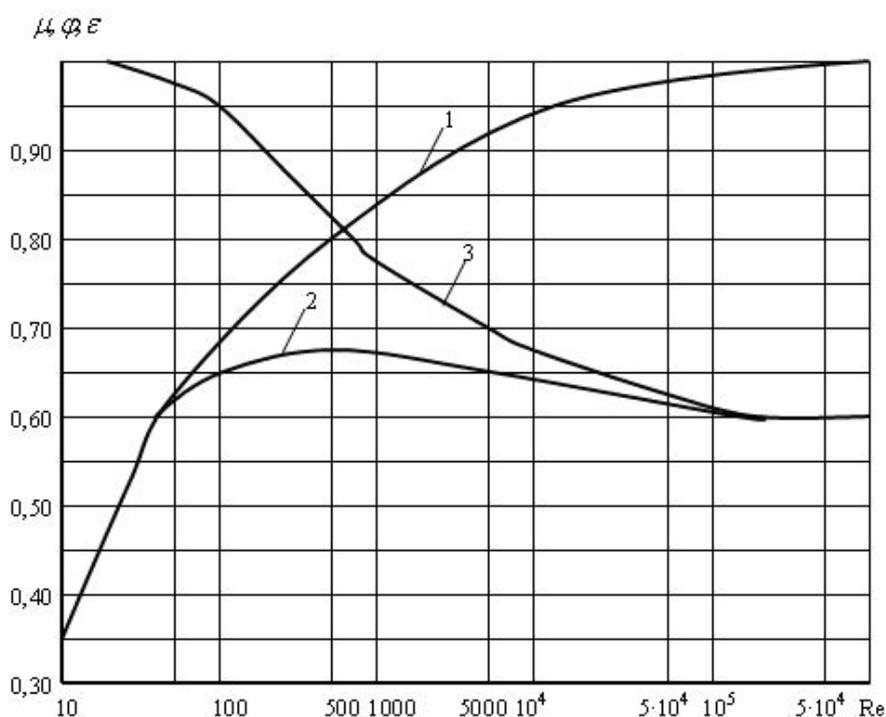


Рис.2. Зависимость коэффициентов истечения из отверстия в тонкой стенке от числа Рейнольдса.

- 1 – зависимость коэффициента скорости φ от Re ,
- 2 – зависимость коэффициента расхода μ от Re ,
- 3 – зависимость коэффициента сжатия струи ε от Re

Далее рассмотрим несколько конкретных примеров.

Пример №1

В производственном помещении установлен резервуар цилиндрической формы, наполненный дизельным топливом. Диаметр резервуара 2,0 м, высота 2,5 м. В боковой стенке резервуара образовалось малое отверстие диаметром $d = 0,03 \text{ м}$. Отверстие расположено вблизи дна резервуара. Напор над центром отверстия $H^* = 2,2 \text{ м}$, температура дизельного топлива 20°C , кинематическая вязкость $\nu = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Причем резервуар установлен таким образом, что его днище расположено на расстоянии 1,5 м от пола помещения. Требуется определить скорость истечения струи из отверстия и ее дальность. На Рис.3 приведена схема, поясняющая расположение резервуара и отверстия в его боковой стенке. За начало координат примем центр отверстия, ось Y направим вертикально вниз, а ось X по горизонтали слева направо.



В этом примере выбран вариант расчета, соответствующий максимальной величине напора H^* и, соответственно, большой дальности струи. При этом следует отметить, что в начальный период времени изменение напора H^* будет практически неизменным, поскольку диаметр резервуара почти на два порядка больше диаметра отверстия.

Определим число Рейнольдса, характеризующее истечение

$$Re = \frac{\sqrt{2gH^*}}{\nu} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2,2 \cdot 0,03}}{5 \cdot 10^{-6}} = 39400.$$

По графику, приведенному на Рис.2, определяем коэффициент скорости φ для полученного значения Рейнольдса $\varphi = 0,96$.

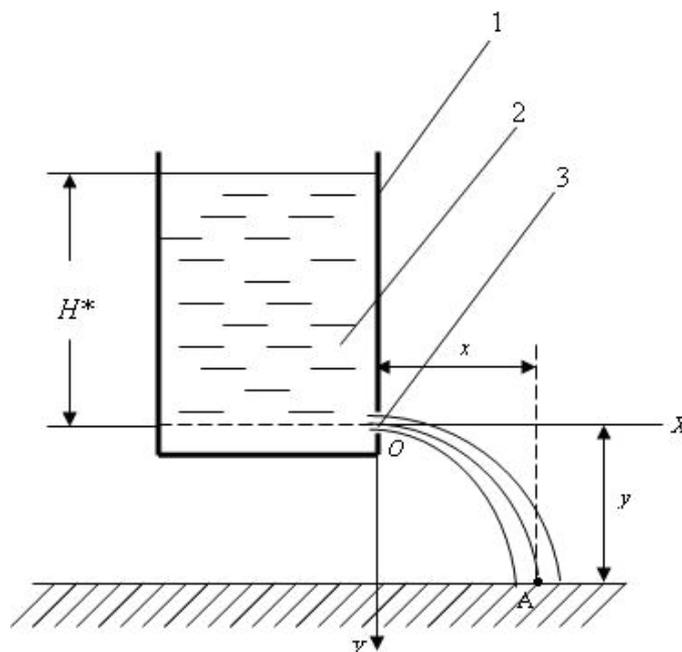


Рис.3. Схема размещения резервуара и схема истечения дизтоплива из отверстия в его боковой стенке.

- 1 – вертикальная стенка корпуса резервуара,
- 2 – дизельное топливо,
- 3 – отверстие

Далее находим скорость истечения дизтоплива из отверстия

$$V = \varphi \sqrt{2gH^*} = 0,96 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2,2} = 6,3 \text{ м/с.}$$

Для определения дальности струи x применим уравнение параболы истечения

$$y = \frac{gx^2}{2V^2},$$

в котором координата y задана условием задачи и составляет 1,5 м

$$x = \frac{Vy}{g} \sqrt{2g} = \frac{6,3 \cdot 1,5}{9,8} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8} \approx 4,2 \text{ м.}$$

Полученный результат позволяет произвести оценку общей площади устройств самотушения, которая обеспечит пожарную безопасность помещения при аварийном разливе дизельного топлива. На Рис.4 показана принципиальная схема размещения сборки устройств самотушения под резервуаром для рассматриваемого примера.



Так как резервуар имеет форму цилиндра, то и вся поверхность устройств самотушения должна в определенной степени соответствовать этой форме, т.е. форме окружности.

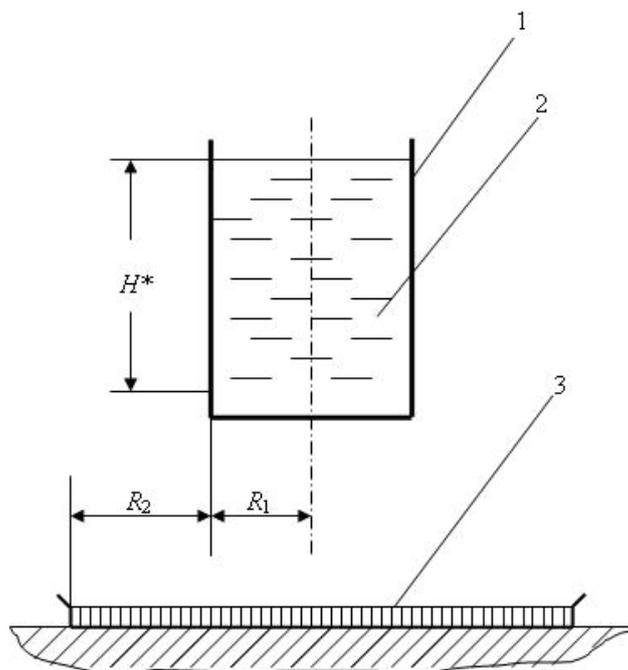


Рис. 4. Принципиальная схема размещения устройств самотушения под резервуаром.
1 – стенки резервуара, 2 – дизельное топливо, 3 – сборка устройств самотушения

Радиус резервуара $R_1 = 1,0$ м, дальнобойность струи дизтоплива $x \approx 4,2$ м. Отсюда определяем площадь круга, состоящего из устройств самотушения $S = \pi (R_1 + R_2)^2 = 85 \text{ м}^2$.

Полученный результат расчета площади устройств самотушения необходимо уточнить, поскольку расстояние $R_2 = x = 4,2$ м определено для точки падения струи на полы помещения. Следовательно, если принять эту площадь за площадь устройств самотушения, то струя дизельного топлива будет падать точно на самую границу сборки устройств самотушения, что совершенно недопустимо. Поэтому, при расчетах, к размеру R_2 следует прибавить еще не менее 0,5 м, т.е. увеличить этот размер на 12% и получить окончательный результат $S = \pi (R_1 + R_2 + 0,5)^2 \approx 105 \text{ м}^2$. Определим объем дизельного топлива, находящегося в резервуаре $V = \pi R_1^2 H^* = 3,14 \cdot (1,0)^2 \cdot 2,2 = 6,9 \text{ м}^3$.

Далее, зная общую площадь сборки устройств самотушения и объем жидкости, который может вылиться из резервуара, можно определить максимальную высоту ее слоя по всей сборке устройств самотушения $h^* = V / S \approx 0,07$ м. Этот результат позволяет определить высоту не заполняемой части сборки вертикальных каналов в устройстве самотушения, которая обеспечит надежное подавление процесса горения жидкости и, соответственно, рассчитать общую высоту всей плоской сборки этих устройств. Методика определения этих параметров подробно описана в предыдущем разделе.

Пример №2

В этом примере рассмотрим вопрос о том, насколько изменится общая площадь устройств самотушения, если в предыдущей постановке задачи сохранить все исходные данные за исключением напора дизтоплива, придав ему значение $H^* = 1,2$ м. Методика расчета аналогична приведенной выше.



Определяем число Рейнольдса, характеризующее истечение

$$Re = \frac{d\sqrt{2gH^*}}{\nu} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1,2} \cdot 0,03}{5 \cdot 10^{-6}} = 29100.$$

По графику (см. Рис.2) определяем коэффициент скорости φ для полученного значения Рейнольдса: $\varphi = 0,95$. Определяем скорость истечения дизельного топлива из отверстия

$$V = \varphi\sqrt{2gH^*} = 0,95 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1,2} = 4,6 \text{ м/с.}$$

Затем, для заданного расположения резервуара относительно пола помещения, определяем дальность струи жидкости по координате X

$$x = \frac{Vy}{g} \sqrt{2g} = \frac{4,6 \cdot 1,5}{9,8} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8} = 3,1 \text{ м.}$$

Площадь круга, состоящего из сборки устройств самотушения, будет равна

$$S = \pi(R_1 + R_2 + 0,5)^2 = 3,14 \cdot (1,0 + 3,1 + 0,5)^2 = 66,4 \text{ м}^2.$$

Таким образом, сравнивая результаты двух рассмотренных примеров, можно заключить, что снижение напора H^* почти в два раза уменьшает площадь поверхности устройств самотушения в 1,5 раза.

Пример №3

В этом примере определим, как влияет кинематическая вязкость горючей жидкости на размеры площади сборки устройств для самотушения горячей жидкости. Все параметры резервуара (уровень жидкости и положение отверстия истечения), приведенные в примере №1, сохраним, а заменим лишь дизельное топливо, вязкость которого $\nu = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, на мазут марки 40 (малосернистая марка), с кинематической вязкостью $\nu = 43 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Определим число Рейнольдса, характеризующего процесс истечения жидкости из отверстия диаметром 0,03 м при $H^* = 2,2 \text{ м}$

$$Re = \frac{d\sqrt{2gH^*}}{\nu} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2,2} \cdot 0,03}{43 \cdot 10^{-6}} = 4,6 \cdot 10^3.$$

По графику (Рис.2) определяем коэффициент скорости φ для $Re = 4,6 \cdot 10^3$: $\varphi = 0,91$. Определяем скорость истечения мазута из отверстия

$$V = \varphi\sqrt{2gH^*} = 0,91 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2,2} = 6,0 \text{ м/с.}$$

Теперь для заданного расстояния днища резервуара от полов помещения определим дальность струи мазута X

$$x = \frac{Vy}{g} \sqrt{2g} = \frac{6,0 \cdot 1,5}{9,8} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8} = 4,1 \text{ м.}$$

Следовательно, площадь круга, состоящего из сборки устройств для самотушения мазута, будет равна $S = \pi(R_1 + R_2 + 0,5)^2 = 3,14 \cdot (1,0 + 4,1 + 0,5)^2 = 98,5 \text{ м}^2$.

Сравнивая результаты расчетов по определению площади сборки устройств для дизельного топлива и для мазута, можно заключить, что существенного различия в величине этих площадей не получено. При этом кинематическая вязкость дизельного топлива почти на порядок меньше кинематической вязкости мазута. По-видимому, существенное уменьшение пло-



пада поверхности сборки должно получаться при еще меньших значениях Re , т.е. при вязких жидкостях.

Далее необходимо решить еще одну важную задачу о том, как определять общую площадь поверхности устройств самотушения, если днище резервуара или емкости, наполненной горючей жидкостью, расположено на расстоянии нескольких десятков сантиметров от пола помещения. При этом, если отверстие, из которого вытекает горючая жидкость, расположено вблизи днища, то дальнобойность струи в направлении X будет наибольшей.

Пример №4

Воспользуемся опять такими же исходными данными, которые приведены в примере №1. Различие будет состоять лишь в том, что днище резервуара или емкости находится на расстоянии 0,3 м от поверхности пола помещения (т.е. координата по оси Y составляет 0,3 м).

Из решений в первом примере следует, что $Re = 3,94 \cdot 10^4$, $\varphi = 0,96$, $V = 6,3$ м/с, $H^* = 2,2$ м.

По этим данным определим дальнобойность струи при расстоянии между полом помещения и днищем резервуара равном 0,3 м

$$x = \frac{Vy}{g} \sqrt{2g} = \frac{6,3 \cdot 0,3}{9,8} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8} = 0,84 \text{ м.}$$

Площадь сборки устройств самотушения в этом случае будет равна

$$S = \pi (R_1 + R_2 + 0,5)^2 = 3,14 \cdot (1,0 + 0,84 + 0,5)^2 = 17,2 \text{ м}^2.$$

Полученный результат нельзя считать окончательным, поскольку отверстие в боковой стенке резервуара может находиться на любом расстоянии от днища.

Определим, как в зависимости от этих расстояний будет изменяться площадь сборки устройств.

а) Пусть центр отверстия в боковой стенке (и, соответственно, начало координат) находится на расстоянии 0,5 м от днища резервуара, и, следовательно, расстояние по оси Y от пола помещения до отверстия составит $(0,5 + 0,3)$ м, т.е. 0,8 м, напор

$$H^* = 2,2 - 0,5 = 1,7 \text{ м.}$$

Все остальные параметры остаются неизменными. Тогда получим следующие результаты:

$$Re = \frac{d \sqrt{2gH^*}}{\nu} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1,7} \cdot 0,03}{5 \cdot 10^{-6}} = 3,46 \cdot 10^4,$$

$$\varphi = 0,95 \text{ (см. Рис.2),}$$

$$V = \varphi \sqrt{2gH^*} = 0,95 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1,7} = 5,48 \text{ м/с,}$$

$$x = \frac{Vy}{g} \sqrt{2g} = \frac{5,48 \cdot 0,8}{9,8} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8} = 2,0 \text{ м,}$$

$$S = \pi (R_1 + R_2 + 0,5)^2 = 3,14 \cdot (1,0 + 2,0 + 0,5)^2 = 38,5 \text{ м}^2.$$

б) Рассмотрим случай, когда отверстие в боковой стенке этого резервуара находится на расстоянии 1,0 м от днища. Следовательно, расстояние по оси Y от пола помещения до отвер-



стия составит 1,3 м, напор $H^* = 1,2$ м. Остальные параметры не меняются. Определим для этих условий задачи величину площади поверхности сборки устройств самотушения:

$$Re = \frac{d\sqrt{2gH^*}}{\nu} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1,2} \cdot 0,03}{5 \cdot 10^{-6}} = 2,9 \cdot 10^4,$$

$$\varphi = 0,95 \text{ (см. график Рис.2),}$$

$$V = \varphi\sqrt{2gH^*} = 0,95 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1,2} = 4,6,$$

$$x = \frac{Vy}{g} \sqrt{2g} = \frac{4,6 \cdot 1,3}{9,8} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8} = 2,7,$$

$$S = \pi(R_1 + R_2 + 0,5)^2 = 3,14 \cdot (1,0 + 2,7 + 0,5)^2 = 55,4 \text{ м}^2.$$

в) Рассмотрим случай, когда отверстие в боковой стенке резервуара расположено на расстоянии 1,8 м от дна.

При этом величина напора $H^* = 0,5$ м. Расстояние от пола помещения до отверстия будет равно 2,1 м. Определим для этого варианта площадь сборки устройств самотушения:

$$Re = \frac{d\sqrt{2gH^*}}{\nu} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,5} \cdot 0,03}{5 \cdot 10^{-6}} = 1,88 \cdot 10^4,$$

$$\varphi = 0,94,$$

$$V = \varphi\sqrt{2gH^*} = 0,94 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,5} = 2,94 \text{ м/с,}$$

$$x = \frac{Vy}{g} \sqrt{2g} = \frac{2,94 \cdot 2,1}{9,8} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8} = 2,78 \text{ м,}$$

$$S = \pi(R_1 + R_2 + 0,5)^2 = 3,14 \cdot (1,0 + 2,78 + 0,5)^2 = 57,5 \text{ м}^2.$$

Таким образом, для рассмотренного выше случая, когда днище резервуара расположено на небольшом ($\sim 0,3$ м) расстоянии от полов помещения, получена следующая зависимость площади поверхности сборки устройств самотушения от положения отверстия (или от напора H^*), из которого происходит истечение дизельного топлива, приведенная на Рис.5.

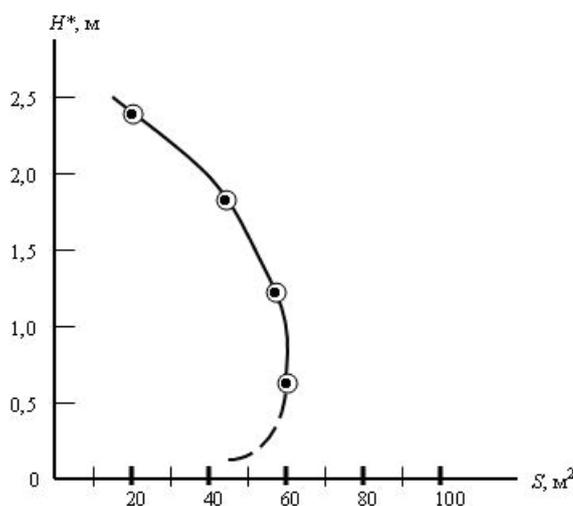


Рис.5. Зависимость площади сборки устройств самотушения для дизтоплива от расположения отверстия в стенке резервуара



Очевидно, что при стремлении H^* к 0, общая площадь S сборки устройств будет стремиться к радиусу R_1 . Судя по графику можно утверждать, что поверхность сборки следует принять равной $\sim 60 \text{ м}^2$. Далее следует определить, какой высоты будет слой дизельного топлива в сборке, если площадь ее поверхности составит 60 м^2 .

Объем дизтоплива, находящегося в резервуаре, равен

$$V = \pi R_1^2 H^* = 3,14 \cdot (1,0)^2 \cdot 2,2 = 6,9 \text{ м}^3.$$

Определим высоту слоя дизтоплива h^* во всей сборке устройств самотушения

$$h^* = V / S = 6,9 / 60 = 0,11 \text{ м}.$$

Все рассмотренные выше примеры истечения горючих жидкостей из боковых стенок резервуаров или баков позволяют произвести оценки площади поверхности устройств самотушения для самых жестких с пожарной точки зрения условий аварийного разлива горящих жидкостей и дают возможность исключить попадания горящих жидкостей на незащищенную часть полов помещения. При этом возможны любые варианты решения задачи пассивного тушения горящих жидкостей, которые позволяют придать устройствам самотушения различные габаритные размеры как по площади их поверхности, так и по высоте.

Приведенная методика оценки размеров площади сборки устройств самотушения необходима для устранения аварийных неуправляемых разливов жидкостей. Методика применима, как было отмечено выше, при диаметре отверстий истечения до 0,3 м.

При проектировании предприятий, в которых предполагается установить систему самотушения горящих жидкостей, необходимо учитывать все приведенные выше варианты истечения горючих жидкостей из отверстий, возникновение которых предполагается возможным в любом месте металлических корпусов резервуаров.

Возможность предотвратить неуправляемый аварийный разлив горящих жидкостей по полам производственных помещений посредством применения устройств самотушения позволяет рассмотреть вопрос о пожароопасной категоричности этих помещений. При этом необходимо оценить экономическую сторону этого вопроса, сопоставив стоимость систем автоматического пожаротушения и их надежность со стоимостью и надежностью срабатывания устройств самотушения жидкостей.

При ликвидации возникшего в резервуаре процесса горения большое значение имеет время истечения горячей жидкости через отверстие, предназначенное для аварийного слива этой жидкости. Вполне очевидно, что чем меньше промежуток времени от момента возникновения пожара до его полной ликвидации, тем меньший ущерб будет нанесен предприятию. С этой целью в различного рода емкостях и резервуарах предусматриваются отверстия для аварийного слива горючей жидкости. На Рис.6 приведена примерная схема решения этой задачи.

Определим, как изменится время истечения жидкости из емкости 1 через отверстие 4 для аварийного слива. Пусть диаметр емкости равен 2,0 м, емкость заполнена мазутом, $\nu = 43 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, диаметр отверстия истечения 0,1 м, высота начального уровня мазута $H_1^* = 2,2 \text{ м}$. Под поверхностью мазута установлен слой устройств самотушения на уровне $H_2^* = 1,8 \text{ м}$. Размеры сборки устройств самотушения 5, размещенных на полах помещения под емкостью, определяются по методике, изложенной в предыдущих примерах.

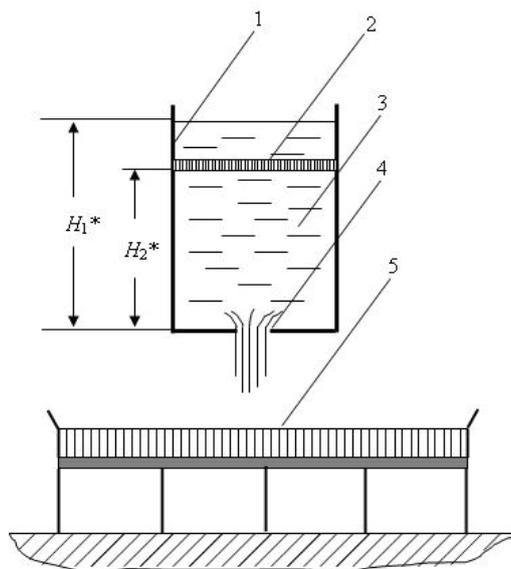


Рис.6. Принципиальная схема расположения устройств самотушения для ликвидации процесса горения в емкости.

1 – стенки емкости, 2 – устройство самотушения, 3 – мазут, 4 – отверстие для аварийного слива, 5 – устройства для приема жидкости

Определим, за какой промежуток времени произойдет тушение горячей поверхности мазута, если открыть отверстие для аварийного слива и уровень мазута в емкости достигнет слоя устройств самотушения. Для этого применим формулу

$$\tau = \frac{2F_1(\sqrt{H_1^*} - \sqrt{H_2^*})}{\mu F_2 \sqrt{2g}}, \quad (5)$$

- где F_1 – площадь горизонтального сечения емкости,
- F_2 – площадь отверстия в днище емкости,
- μ – коэффициент расхода отверстия,
- H_1^* – начальный уровень мазута в емкости,
- H_2^* – уровень расположения слоя устройств самотушения,
- g – ускорение свободного падения.

Для определения коэффициента μ следует использовать график, приведенный на Рис.2, определив предварительно число Рейнольдса по формуле

$$Re = \frac{F_2(2gH_1^*)}{\nu} = \frac{0,1 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2,2}}{43 \cdot 10^{-6}} = 1,5 \cdot 10^4,$$

$$\mu = 0,64.$$

Далее по формуле (5) определим величину τ :

$$F_1 = 3,14 \text{ м}^2, \quad F_2 = 0,78 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2,$$

$$\tau = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot (\sqrt{2,2} - \sqrt{1,8})}{0,64 \cdot 0,78 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8}} = 40 \text{ с.}$$

Таким образом, полученный результат говорит о том, что через 40 с, считая с момента открытия отверстия аварийного слива, пламя будет полностью потушено. По формуле (5) мож-



но определять времена истечения для различных по вязкости жидкостей (за исключением случаев соответствующих $Re \leq 10$) для отверстий различных диаметров. Это позволяет находить конструктивные решения, обеспечивающие максимальную эффективность тушения пожаров. Так, например, при диаметре отверстия истечения равном 0,2 м для указанных выше исходных данных время тушения $\tau \approx 11$ с.

Можно также определить время полного опорожнения емкости, т.е. когда $H_1^* = 0$. Очевидно, что формулу (5) можно применять в случае истечения из отверстия в боковой стенке емкости. В этом варианте напор H^* отсчитывается от центра тяжести отверстия.

2. Горючая жидкость находится в емкости при повышенном давлении

Использование устройств самотушения для ликвидации пожаров, возникающих в оборудовании и емкостях, работающих в штатном режиме под давлением, невозможно без применения специальных защитных кожухов, экранирующих щитов и других устройств, обеспечивающих требуемое направление потоков горящих жидкостей, имеющих место в аварийных условиях.

Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев емкости с горючими жидкостями, находящиеся под давлением в несколько атмосфер, имеют относительно небольшие размеры. Это обусловлено высокими требованиями к прочностным характеристикам металлических корпусов.

Существуют способы, позволяющие рассчитать, например, скорость истечения жидкости из емкости, находящейся под давлением, или дальнобойность струи из образовавшегося в корпусе отверстия. Однако производить подобного рода оценки не имеет смысла, поскольку струя жидкости, истекающая из емкости будет иметь весьма большую дальнобойность.

Единственным способом, позволяющим устранить произвольное истечение горючей жидкости из системы, находящейся под давлением, является установка кожухов на все наиболее пожароопасные узлы и магистрали, по которым циркулирует горючая жидкость. Эта тема подробно рассматривалась в предыдущем разделе.

На Рис.7 приведена принципиальная схема конструкции и размещения металлического кожуха, установленного на емкости, находящейся под давлением, превышающим атмосферное. При такой схеме защиты течь, возникшая в любом месте корпуса, будет всегда попадать в устройство самотушения. Расстояние δ между стенками емкости и защитным кожухом должна быть не более 100 мм. Этот размер позволит за короткий промежуток времени ликвидировать процесс горения, если он возникает на боковой поверхности емкости, т.к. продукты горения, собираясь в верхней части кожуха, быстро заполнят все пространство между корпусом емкости и кожухом и ликвидируют процесс горения. В данном случае защитный кожух, расположенный так, как показано на схеме Рис.6, является своего рода устройством самотушения. При этом нижняя кромка кожуха должна находиться на расстоянии, которое определяется профилем перехода от вертикальных стенок емкости к ее донной части. Если этот профиль близок к элементу окружности и соответствует радиусу R , то радиально направленная струя не должна попадать на незащищенную часть полов помещения.

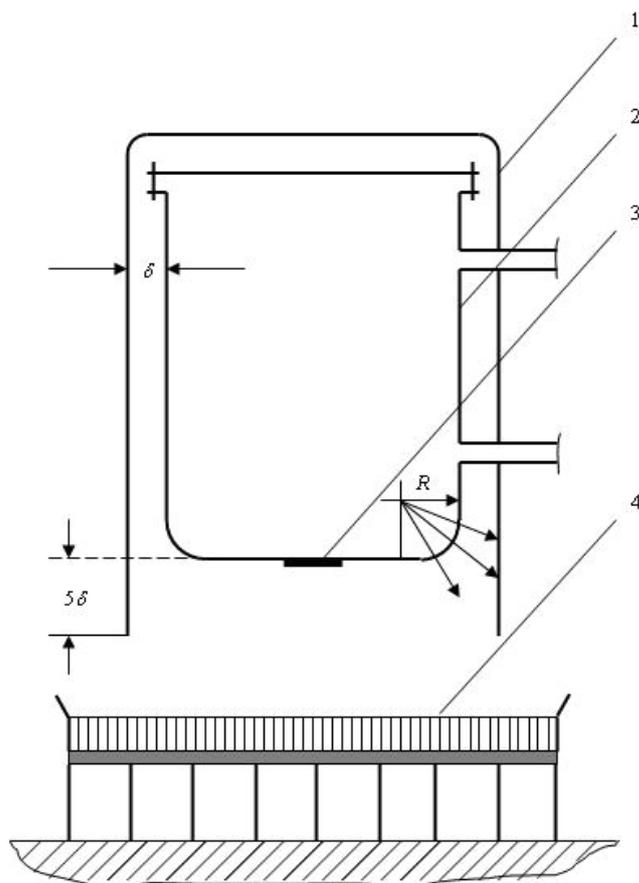


Рис.7. Принципиальная схема расположения кожуха, предохраняющего от неуправляемого аварийного истечения жидкости из герметичного бака, находящегося под давлением.

- 1 – металлических кожух, 2 – бак с горючей жидкостью,
- 3 – клапан для аварийного слива жидкости, 4 – устройства для самотушения жидкости

Если этот профиль имеет прямоугольную форму, то нижние кромки кожуха должны находиться на расстоянии не менее 5δ от днища емкости. Устройства самотушения, расположенные под емкостью, проектируются обычным способом и рассчитываются на прием всей жидкости, которая может вылиться при аварии.

Вариант конструкции и размещения устройств самотушения

Пусть устройства для самотушения горящих жидкостей представляют собой систему сообщающихся прямоугольных емкостей, в каждой из которых размещено несколько элементов с расположенной в них ячеистой структурой вертикальных каналов. Боковые стенки этих элементов должны плотно прилегать друг к другу. На Рис.8 приведена схема расположения емкостей, под открытым резервуаром (вид сверху), имеющим цилиндрическую форму. Расстояние $R_1 + R_2 + 0,5$ определяется, как было показано выше, режимом истечения жидкости из вертикальных стенок резервуара. Длина вертикальных стенок каждой емкости принята равной 1,0 м, высота 0,2 м.

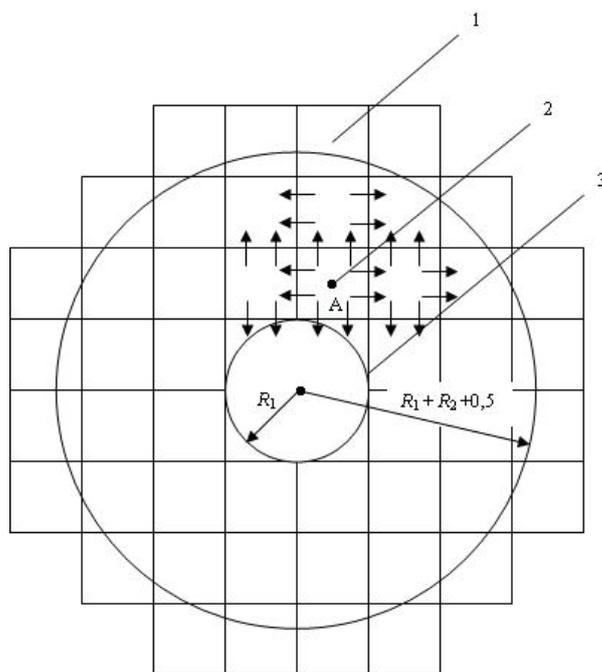


Рис.8. Схема расположения сборки сообщающихся между собой емкостей, расположенных под резервуаром с горючей жидкостью.

1 – емкость, 2 – условное место падения струи (точка А), стрелки – начальная схема растекания жидкости, 3 – резервуар с горючей жидкостью

Главное требование, предъявленное к сборке плоских емкостей, состоит в том, чтобы исключить протекание жидкости на полы помещения между вертикальными стенками емкостей.

В каждую емкость сборки должны устанавливаться девять элементов с ячеистой структурой вертикальных каналов и сеточными элементами. Эти элементы имеют в горизонтальном сечении форму квадрата. Опытным путем было установлено, что оптимальный размер стороны квадрата должен находиться в пределах $300 \div 500$ мм. При этом достигается относительно простая технология изготовления и удобство сборки всей системы самотушения.

Приведенная выше методика определения площадей, на которых должны устанавливаться УСП, позволяет одновременно получить размеры для применения наклонных полов, предназначенных для быстрого стекания горячей жидкости. Это существенно уменьшит площадь, занимаемую УСП. На поверхности наклонных полов следует установить перегородки, разделяющие их поверхность на секции и направляющие потоки горячей жидкости к УСП. Перегородки в значительной мере уменьшат площадь разлива по поверхности полов и снизится эффект разбрызгивания. При данной схеме защиты необходимо предусмотреть отвод потушенной жидкости в дополнительную резервную емкость.

На Рис.9 в изометрии изображен внешний вид одного такого элемента сборки. Ориентировочные размеры корпуса элемента указаны на рисунке. Размеры проемов, предназначенных для растекания жидкости по дну емкости, следует определять по площади отверстия для аварийного слива жидкости из резервуара.

В рассматриваемом примере диаметр отверстия равен $0,2$ м и, следовательно, площадь сечения $0,03 \text{ м}^2$. Поэтому суммарная площадь четырех проемов не должна быть меньше $0,03 \text{ м}^2$. Указанные на Рис.9 размеры проемов имеют общую площадь $0,03 \text{ м}^2$.

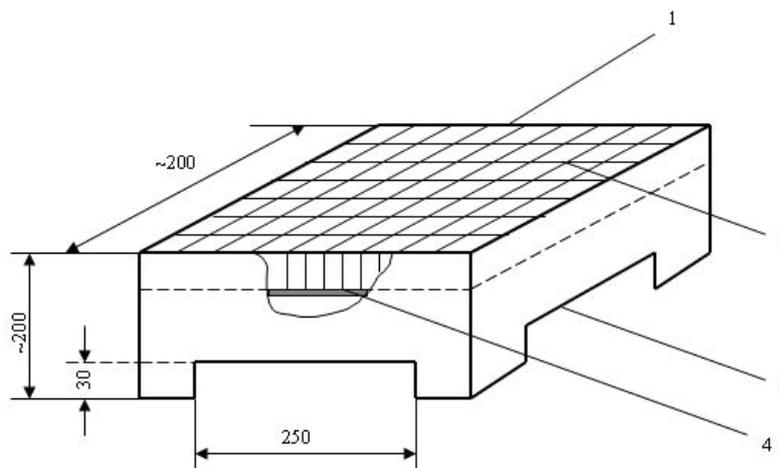


Рис.9. Внешний вид одного из девяти элементов, устанавливаемых в каждой емкости сборки.

- 1 – вертикальные стенки корпуса элемента, 2 – ячеистая структура устройства,
- 3 – слой сеточных элементов, 4 – проемы для растекания жидкости в емкости

В заключении следует отметить, что квадратная форма емкостей в сборке устройств самотушения жидкостей, приведенная на Рис.8, может быть заменена (в зависимости от потребностей защищаемого производства) формами, удобными для реальных условий в помещениях. Ниже приведены лишь несколько примеров конструктивного исполнения отдельных емкостей, входящих в сборку устройств самотушения (см. Рис.10).

Все рассмотренные в данном разделе примеры расчетов определили принципы решения основных наиболее важных вопросов, возникающих при проектировании и изготовлении устройств для самотушения горящих при аварийном проливе жидкостей.

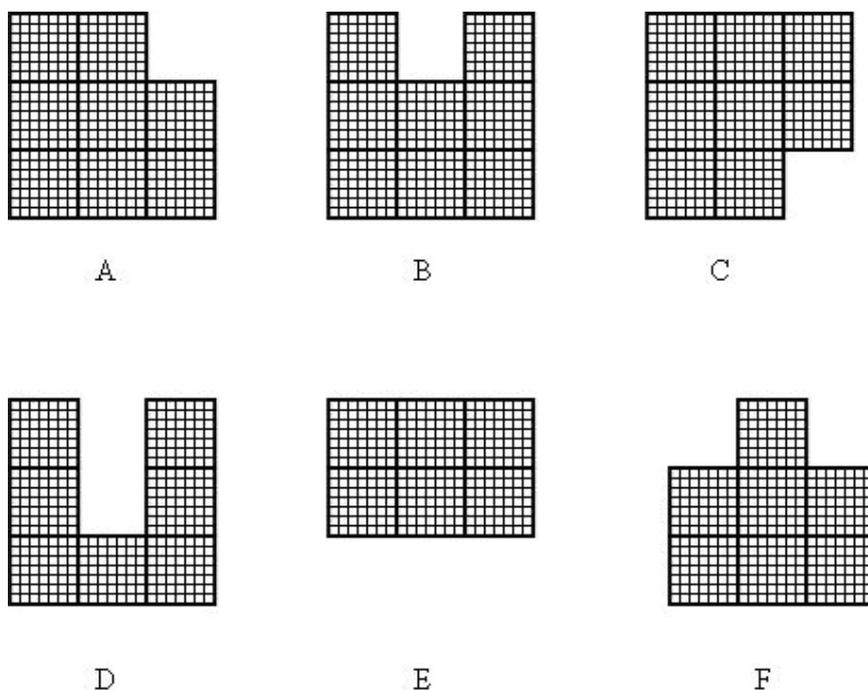


Рис.10. Варианты конструктивного исполнения отдельных емкостей, входящих в сборку системы самотушения