

В. С. МЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Международный противопожарный центр (Россия, 115446, г. Москва, Коломенский пр., 14; e-mail: melnikov@firecenter.ru)

М. В. МЕЛЬНИКОВ, специалист, Международный противопожарный центр (Россия, 115446, г. Москва, Коломенский пр., 14)

В. П. МОЛЧАНОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры общей и специальной химии, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

Д. Л. БАСТРИКОВ, канд. техн. наук, директор Департамента промышленной и пожарной безопасности опасных производственных объектов, Международный противопожарный центр (Россия, 115446, г. Москва, Коломенский пр., 14; e-mail: dlbastrikov@mail.ru)

УДК 614.841.41

УСЛОВИЯ ПОЖАРА ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЮ РЕЗЕРВУАРОВ

Изучены условия, при которых пожар пролива развивается по вертикальным конструкциям цилиндрических резервуаров нефти и нефтепродуктов, для чего были проведены огневые испытания и эксперименты на холодном гидравлическом стенде. Выполнено физическое моделирование аварии и пожара пролива с использованием пропитки теплоизоляционного слоя бензином, дизельным топливом и моторным маслом. Изучено распространение пламени в вентилируемом зазоре и тление при отсутствии зазора между обшивкой и теплоизоляционным слоем. Показано, что для всех конструктивных решений зафиксирован определенный тепловой эффект, но наибольшую опасность представляет скрытое распространение горения. Получены данные для оценки остаточного содержания нефтепродуктов в теплоизоляционном слое в зависимости от времени после аварии пролива. Предложено эти данные использовать для прогноза длительности и интенсивности пожара пролива. Выявлены признаки процессов дистилляции и ректификации нефтепродуктов, которые могут сопровождать вертикальный пожар пролива и способствовать распространению горения легких газообразных продуктов вверху теплоизоляционного слоя, а также горению тяжелых фракций в его нижней части. Сделаны выводы о том, что при своевременном прекращении аварии пролива процесс десорбции существенно снижает пожарную нагрузку теплоизоляционного слоя, однако длительное время сохраняется опасность возгорания, особенно в случае пропитки минеральной ваты вязкими нефтепродуктами. Отмечено, что повышение температуры во время пожара пролива приводит к уменьшению вязкости нефтепродуктов, которыми пропитана минеральная вата, в результате чего усиливается десорбция, ускоряется истечение горючей жидкости и становится более вероятным переход вертикального пожара пролива в горизонтальный.

Ключевые слова: пожар пролива; резервуар; теплоизоляция; минеральная вата; пожарная опасность; тление; распространение горения; пропитка; нефтепродукты; огневые испытания; дистилляция; ректификация; гидравлические испытания; сорбция; десорбция; истечение; сорбционная емкость; содержание горючей жидкости; пожарная нагрузка.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.31-40

Введение

Резервуары, трубопроводы и другую аппаратуру часто выполняют с теплоизоляцией из минеральной ваты. Этот материал производится из неорганических волокон с пропиткой связующими веществами, обеспечивающими требуемые эксплуатационные свойства, в том числе гидрофобность в отношении воды. Однако такая технология совершенно не защищает от смачивания многими другими жидкостями: минеральная вата хорошо сорбирует нефть, нефтепродукты (моторные топлива, масла, раство-

рители, антифризы и т. д.). Поэтому пожарная опасность пролива горючих жидкостей (ГЖ) на строительные конструкции с теплоизоляционным слоем из минеральной ваты связана с возможностью скрытого и открытого распространения горения [1].

Целью настоящего исследования было развитие указанной темы в плане раскрытия начальных условий, конструктивных факторов и значимости свойств нефтепродуктов в случае вертикального пожара пролива на теплоизоляции цилиндрических резервуаров нефти и нефтепродуктов. Для достижения по-

ставленной цели решались задачи моделирования как аварии, так и пожара пролива.

Отметим, что резервуары и, соответственно, теплоизоляционный слой могут иметь значительную высоту (от 6 до 21 м по ГОСТ Р 52910–2008).

Сценарии аварий и пожаров пролива для рассматриваемых объектов начинаются с перелива, нарушения герметичности резервуара, задвижек, фланцевых соединений и пропитки теплоизоляции [2]. Дальнейшие события зависят от устройства несущей подконструкции, размещения обшивки относительно теплоизоляционного материала, свойств теплоизоляционного материала, свойств горючей жидкости, длительности перерыва между проливом и моментом появления источника зажигания.

Среди конструктивных решений ограничимся рассмотрением двух вариантов крепления металлической обшивки. Первый вариант применяется в вентилируемых фасадных системах и предусматривает зазор между обшивкой и теплоизоляционным материалом, второй предполагает такое размещение обрешетки, при котором обшивка крепится вплотную по теплоизоляционному материалу, а слойка, состоящая из стенки резервуара, теплоизоляции и обшивки, имеет свойства сэндвич-панели.

При моделировании процессов, связанных с пожаром пролива, удобно использовать содержание ГЖ в единицах массы на единицу объема теплоизоляционного материала E (кг/м³):

$$E_{\min} < E < E_{\max}, \quad (1)$$

где E_{\min} — минимальное содержание горючей жидкости (остаточное влагосодержание);

E_{\max} — сорбционная емкость теплоизоляционного материала.

Показатель E характеризует одновременно и пропитку (т. е. реализацию сорбционной способности), и пожарную нагрузку теплоизоляционного материала горючей жидкостью.

В рамках настоящей работы будем рассматривать сочетания распространенной минеральной ваты и ее пропитку (пожарную нагрузку) бензином, дизельным топливом (ДТ) или моторным маслом.

Для этих модельных систем значения E_{\max} легко установить методом затопления теплоизоляционного материала. В нормальных условиях (при температуре 0...25 °С) они находятся в пределах, приведенных в табл. 1.

При промышленной аварии полное затопление минеральной ваты наступает, когда расход пролива ГЖ L_{\max} на площадь поперечного сечения теплоизоляционного слоя F достигает значений, указанных в табл. 1 (L_{\max}/F). Увеличение плотности орошения выше этих значений приводит к переливу и стеканию жидкости по поверхности. Однако этот случай выходит за рамки настоящей работы: авторы ограничились изучением процесса пропитки после прекращения пролива с плотностью орошения, близкой к максимальной. Такой пролив неизбежно сопровождается десорбцией и истечением жидкости, поскольку конструктивные решения не предполагают герметизацию теплоизоляционного слоя.

Аналогичные темы исследований относятся к области гидрогеологии [3], фильтрации жидкости через толстые слои осадка и т. д., но наиболее близкие направления можно найти в публикациях, посвященных процессам в массообменных аппаратах с нерегулярной насадкой [4], в исследованиях процесса сушки [5] и капиллярных явлений взаимодействия жидкостей с текстильными (ткаными и неткаными) материалами [6].

Как известно, в предельном режиме отсутствия взаимодействия жидкости и теплоизоляционного слоя скорость истечения жидкости V (м/с) оценивается аналогично скорости свободного падения тела с высоты h по формуле Торричелли:

$$V = \varphi \sqrt{2gh}, \quad (2)$$

где φ — коэффициент, учитывающий влияние формы и размера истекающего потока;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Если принять, что взаимодействие истекающей жидкости и теплоизоляционного слоя аналогично взаимодействию непрерывного потока и капилля-

Таблица 1. Свойства нефтепродуктов, сорбционная емкость и плотность орошения минеральной ваты*

Table 1. Properties of oil products, sorptive capacity and density of mineral wool spraying*

Нефтепродукт Oil product	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Кинематическая вязкость ν , мм ² /с (при температуре, °С) Kinematic viscosity ν , mm ² /s (at temperature, °С)	E_{\max} , кг/м ³ / E_{\max} , kg/m ³		L_{\max}/F , кг/(с·м ²) L_{\max}/F , kg/(s·m ²)
			[1]	Дополнено в настоящем исследовании Added	
Бензин / Gasoline	738	0,65 (20)	536...548	555...765	2,5...3,7
Дизельное топливо / Diesel oil	821	2,44 (20)	723...771	736...827	1,9...2,4
Моторное масло / Motor oil	870	15 (100)	—	720...843	0,04...0,06

* Кажущаяся плотность минеральной ваты $\rho_{mv} = 87,4$ кг/м³ / Apparent mineral wool viscosity $\rho_{mv} = 87.4$ kg/m³.

ра, то скорость истечения можно оценить по формуле Пуазейля:

$$V = kh, \quad (3)$$

где k — коэффициент, учитывающий вязкость жидкости, геометрию и материал капилляра.

Реальные условия истечения далеки от указанных. Десорбцию только в начальный короткий период времени и только в предельно пропитанной минеральной вате можно представить как непрерывное и неразрывное истечение. Сразу после снижения содержания жидкости E ниже сорбционной емкости E_{\max} внутри теплоизоляционного слоя происходит разрыв стекающей жидкости на отдельные пленки, струи и капли. Некоторые из них удерживаются волокнами материала, а другие участвуют в коагуляции, из-за которой вес образующихся больших агрегатов превышает капиллярные силы. Формируется капиллярно-капельный и пленочно-капельный режимы истечения. Теплоизоляционный слой заполняется истекающим потоком не полностью, поэтому скорость истечения только условно можно считать относительно свободной площади поперечного сечения. Локальные скорости могут многократно отличаться от средних значений.

Аналогичный переход затопленной нерегулярной насадки в рабочий режим является стохастическим процессом, зависящим от свойств насадки, свойств жидкости и температуры [4]. Изучение процесса сушки показывает также, что остаточное влагосодержание E_{\min} зависит от сорбционной емкости E_{\max} , температуры и высоты сорбента (в нашем случае — от высоты слоя теплоизоляционного материала) [5].

С учетом известных опубликованных сведений [7–9] практическую ценность представляют новые данные, касающиеся конкретных конструкций, материалов и веществ. Для этого требуется постановка эксперимента с условиями истечения, приближенными к условиям пожара пролива.

Гидравлические испытания

Исследования проводили на установке колонного типа, где имелась возможность смонтировать из образцов вертикальную модель высотой от 1 до 6 м (рис. 1,а). К началу эксперимента (рис. 1,б) с помощью лабораторных весов определяли массы сухих образцов минеральной ваты g_i и начальную массу нефтепродукта F_{\max} .

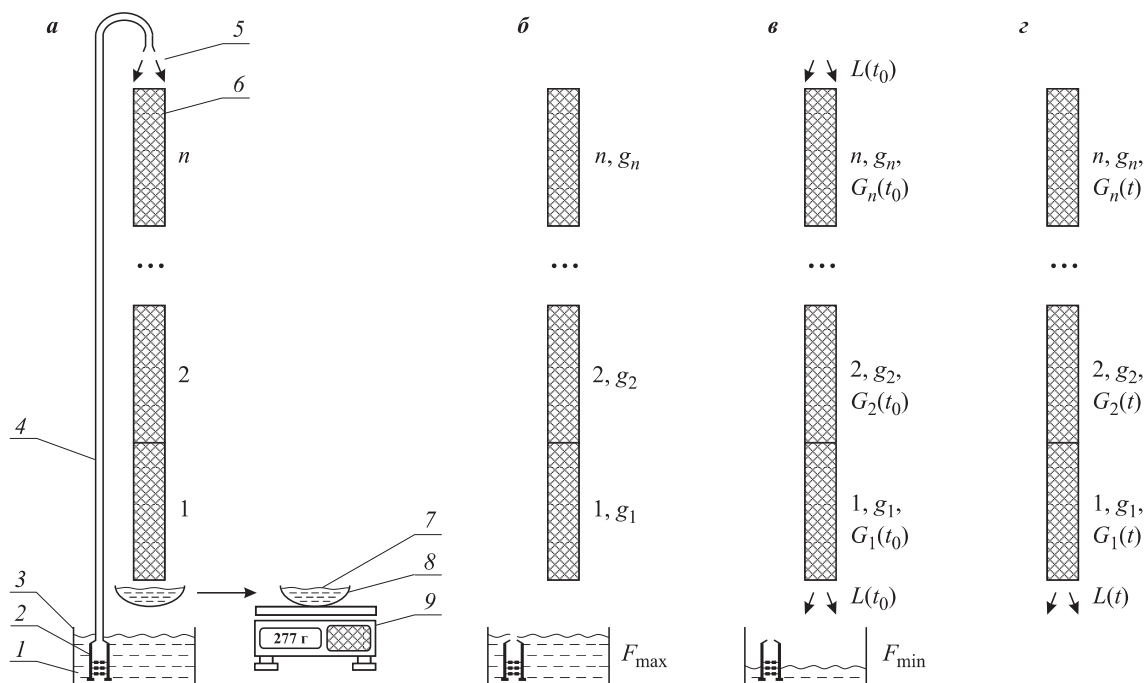


Рис. 1. Схема установки (а) и расчетные схемы до испытания (б), в установившемся режиме орошения (пролива) (в), в режиме десорбции (з): 1 — исследуемая жидкость (нефтепродукт); 2 — насос; 3 — резервуар; 4 — линия подачи; 5 — ороситель; 6 — образцы минеральной ваты; 7 — исследуемая жидкость в сборнике; 8 — сборник; 9 — лабораторные весы; F_{\max} — начальная масса жидкости; F_{\min} — остаток жидкости в резервуаре после полного затопления образцов, включая остаток в линии подачи; $L(t)$ — расход жидкости в момент времени t ; n — число образцов в колонне; g_i — масса i -го образца; $G_i(t)$ — масса жидкости в i -м образце в момент времени t

Fig. 1. Installation diagram (a) and design diagrams before test (b), in the steady spraying mode (spill) (v), in the desorption mode (z): 1 — fluid under testing (petroleum product); 2 — pump; 3 — tank; 4 — supply line; 5 — spraying; 6 — mineral wool samples; 7 — fluid under testing in the storage; 8 — storage; 9 — laboratory balance; F_{\max} — fluid initial mass; F_{\min} — fluid residue in the tank after complete flooding of samples, including residue in the supply line; $L(t)$ — fluid output in time unit t ; n — number of samples in the column; g_i — mass of i sample; $G_i(t)$ — fluid mass in i sample at time unit t

В ходе эксперимента осуществляли пролив нефтепродукта I , который подавали с помощью насоса 2 из резервуара 3 по линии 4 к оросителю 5, установленному на колонне из образцов 6 (см. рис. 1,а). Расход насоса регулировали так, чтобы обеспечить полное затопление образцов с минимальным переливом. Орошение колонны проводили до выхода на стационарный режим, т. е. до полного затопления минеральной ваты и формирования стабильного потока истечения $L(t_0)$ внизу колонны (рис. 1,б). Затем орошение прекращали, измеряли количество остатка жидкости в резервуаре и линии орошения F_{min} , а также определяли расход жидкости, истекающей снизу колонны по времени $L(t)$ (рис. 1,в). Для этого за периоды времени Δt отбирали жидкость 7 в сборник 8 и определяли массу слива с помощью лабораторных весов 9 (см. рис. 1,а). После прекращения десорбции на момент времени t_{max} взвешиванием устанавливали массу пропитанных образцов $B_i(t_{max})$ и остаточную массу жидкости в образцах:

$$G_i(t_{max}) = B_i(t_{max}) - g_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Для расчета массы жидкости в образцах $G_i(t)$ для всех моментов времени t в диапазоне $t_0 \leq t \leq t_{max}(t_0 = 0)$ использовали следующие уравнения материального баланса:

$$F_{max} = F_{min} + \sum_{i=1}^n G_i(t_0); \quad (5)$$

$$F_{max} = F_{min} + \sum_{i=1}^n G_i(t) + \int_0^t L(t) dt; \quad (6)$$

$$F_{max} = F_{min} + \sum_{i=1}^n G_i(t_{max}) + \int_0^{t_{max}} L(t) dt. \quad (7)$$

В системе (5)–(6) количество измеряемых материальных потоков избыточно относительно числа уравнений, поэтому для предотвращения потери информации решение осуществляли методом квадратичного программирования с корректировкой, т. е. с учетом поправок, зависящих от распределений погрешностей измерений компонентов материального баланса [10]. Требуемые в таком методе статистики распределений находили путем обработки данных повторных экспериментов.

Окончательное решение получали в виде значений содержаний горючей жидкости в единице объема минеральной ваты:

- для полного набора образцов в колонне:

$$E(t) = \rho_{MB} \sum_{i=1}^n G_i(t) / \sum_{i=1}^n g_i; \quad (8)$$

- для каждого образца в отдельности:

$$E_i(t) = \rho_{MB} G_i(t) / g_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

Результаты обобщали в виде графиков, примеры которых показаны на рис. 2–4.

Заметим, что зависимости остаточного содержания от времени являются интегральными характеристиками, которые практически всегда монотонны и хорошо совпадают при повторении экспериментов.

Рассматривая эти данные, следует обратить внимание на существенную зависимость характера истечения из минеральной ваты от вязкости нефтепродуктов. Для сравнения вклада этого параметра график на рис. 2 был специально растянут по оси

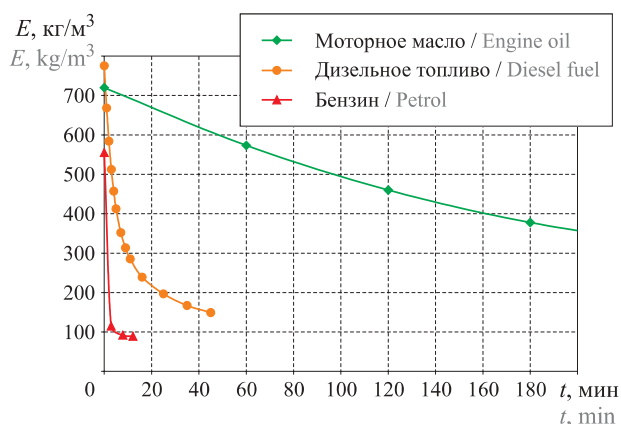


Рис. 2. Зависимость содержания нефтепродуктов в минеральной вате от времени десорбции при высоте теплоизоляционного слоя $H = 1$ м

Fig. 2. Dependency of oil products content in mineral wool from desorption time at heat insulation layer height of $H = 1$ m

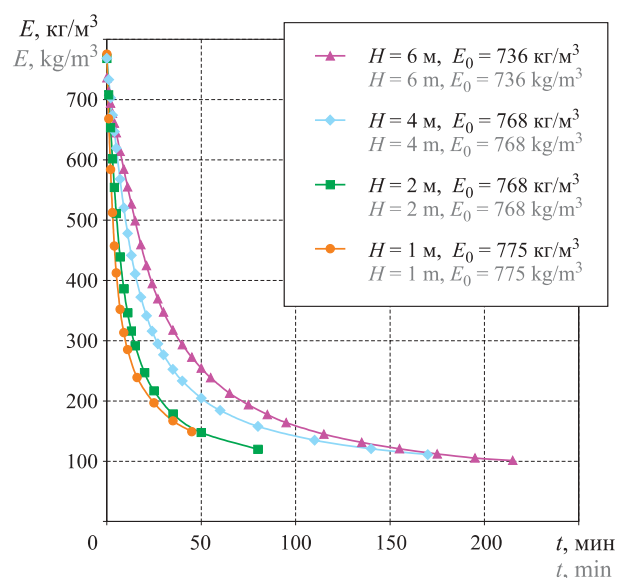


Рис. 3. Зависимость содержания дизельного топлива в минеральной вате от времени десорбции при различной высоте теплоизоляционного слоя: H — высота колонны из образцов; E_0 — содержание дизельного топлива в начале эксперимента

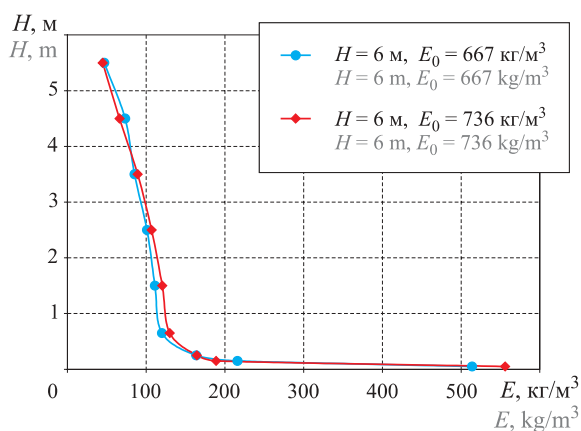


Рис. 4. Профили содержания дизельного топлива E в минеральной вате по высоте теплоизоляционного слоя H при завершении десорбции

Fig. 4. Profiles of diesel oil content E in mineral wool with regard of heat insulation layer height H with the completion of desorption

времени. Благодаря этому заметно, что остаточное содержание бензина за 10 мин истечения меньше остаточного содержания дизельного топлива за 1 ч и масла — за 3 ч. Полученные значения, которые не отражены на графике, показывают, что остаточное содержание моторного масла и за 10 ч истечения выше остаточного содержания дизельного топлива за 1 ч истечения.

Во время вертикального пожара пролива вязкость нефтепродуктов заметно уменьшается из-за повышения температуры, и это следует учитывать, используя зависимости, полученные в изотермических условиях.

Другой фактор истечения — высота теплоизоляционного слоя. Как показано на рис. 3, увеличению высоты соответствует более медленное уменьшение остаточного содержания нефтепродукта. При одинаковых начальных условиях и времени истечения пожарная нагрузка (нагрузка на единицу объема) теплоизоляционного слоя после аварии пролива будет выше для теплоизоляционного слоя, имеющего большую высоту.

Начальное содержание нефтепродукта в минеральной вате является важным условием, если пожар пролива случился сразу или в короткий период времени после аварии. Когда истечение горючей жидкости продолжается до завершения десорбции, пожарная опасность (остаточное содержание) мало зависит от начальных условий. Для подтверждения этого сравнивали распределения горючих жидкостей по высоте теплоизоляционного слоя при разном начальном содержании (см. рис. 4).

Важно отметить, что замедление (почти полное прекращение) десорбции нефтепродуктов из вертикальных образцов минеральной ваты позволяет сделать вывод о высокой пожарной опасности пропитанного теплоизоляционного слоя даже тогда, когда

после аварии пролива прошло значительное время. Кроме того, рассматривая профили остаточного содержания горючих жидкостей (см. рис. 4), следует выделить нижнюю часть вертикального теплоизоляционного слоя, где вес жидкости сколь угодно долго уравнивается капиллярными силами, а остаточное содержание соизмеримо с сорбционной емкостью.

Далее высокая опасность пожара пролива при внесении источника зажигания была подтверждена даже для тех участков по высоте теплоизоляционного слоя из минеральной ваты, на которых остаточное содержание нефтепродукта было минимальным ($E_{\min} \approx 50 \text{ кг/м}^3$).

Испытания на пожарную опасность

Для выбранных модельных систем и конструкций были проведены огневые испытания. Фотографии, фиксирующие ход испытаний, и полученные при этом типичные результаты представлены на рис. 5–9.

При подготовке испытаний выполняли конструкции с зазором S из вертикально установленных пло-



Рис. 5. Развитие пожара пролива дизельного топлива в зазоре 60 мм между вертикальным образцом минеральной ваты высотой 1 м и стальной обшивкой в различные моменты времени от начала пожара (мин:с) при $E = 164 \text{ кг/м}^3$

Fig. 5. Diesel oil spill fire development in the clearance of 60 mm between vertical sample of mineral wool with height 1 m and steel shell at different moments from the beginning of fire (min:s) at $E = 164 \text{ кг/м}^3$

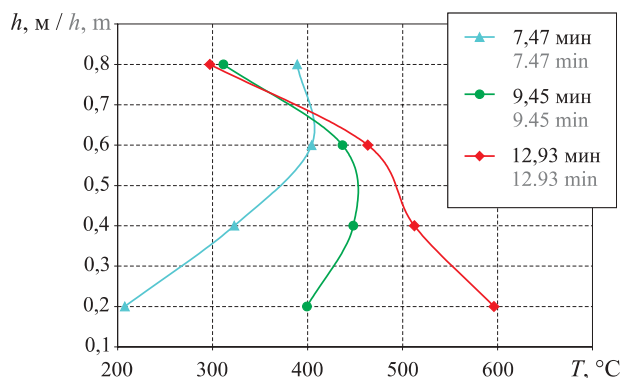


Рис. 6. Профили температур вертикальной обшивки, установленной с зазором 30 мм по высоте образца минеральной ваты, в различные моменты времени для пожара пролива дизельного топлива при начальном содержании ДТ в образце 328 кг/м³

Fig. 6. Temperature profiles of the vertical sheet, installed with the clearance of 30 mm regarding height of mineral wool sample, at various moments of time for the diesel oil spill fire at initial content of diesel oil in the sample 328 kg/m³

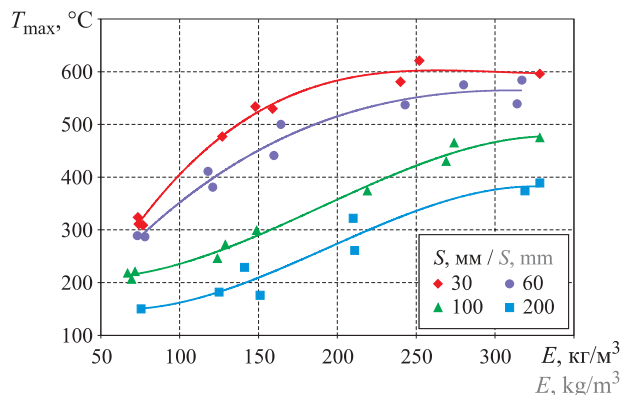


Рис. 7. Зависимость максимальных температур обшивок T_{max} во время пожаров пролива от начального содержания дизельного топлива E при различных зазорах s между обшивками и вертикальными образцами минеральной ваты

Fig. 7. Dependencies of sheet maximum temperatures T_{max} during spill fires from initial content of diesel oil E for various values of clearance s between sheets and mineral wool vertical samples

ских образцов минеральной ваты с параллельным расположением обшивки на расстоянии 30, 60, 100 и 200 мм. Увеличенные (против реальных) значения зазоров (100 и 200 мм) использовали для более полного анализа зависимости теплообменных процессов от этого конструктивного параметра.

Во всех случаях, когда минеральная вата была пропитана горючей жидкостью, после внесения источника зажигания возникало пламенное горение в зазоре между теплоизоляционным слоем и обшивкой.

Видеорегистрацию процесса горения в ходе испытаний осуществляли с бокового торца модели (см. рис. 5). Эксперименты проводили, изменяя начальное содержание горючих жидкостей E .

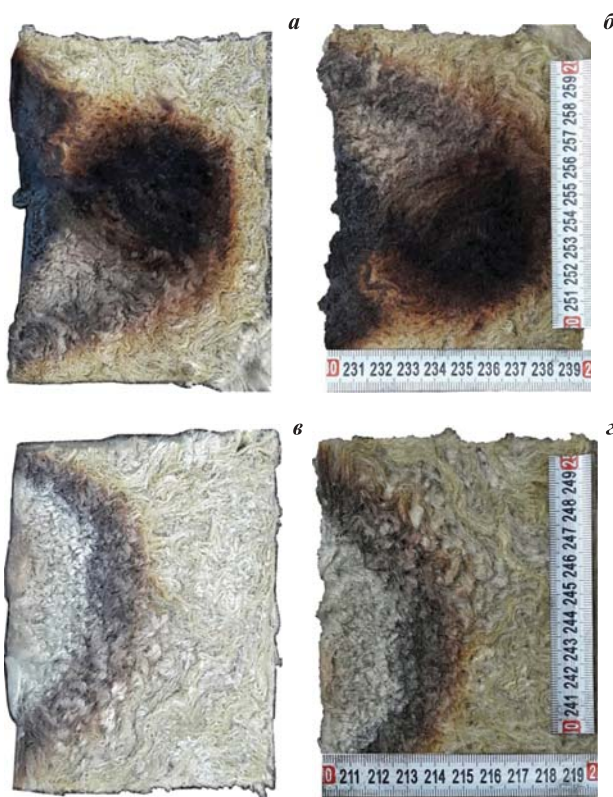


Рис. 8. Разрезы образцов минеральной ваты, поврежденных в результате точечного огневого воздействия на стальную обшивку, установленную без зазора: *a, б* — образец с проливом дизельного топлива с последующим тлением; *в, г* — сухой образец без последующего тления

Fig. 8. Sections of mineral wool, damaged as a result of point fire impact on steel sheet, installed without clearance: *a, b* — the sample with diesel oil spill with the following smoldering; *v, g* — the dry sample without follow-up smoldering

Важно отметить, что при больших значениях начального содержания жидкостей ($E > 250$ кг/м³) с повышением температуры во время горения наблюдалась интенсивная десорбция. Вначале внизу образца минеральной ваты стекали капли и струи жидкости, а затем горящие капли. Таким образом, вертикальный пожар пролива имел тенденцию перехода в горизонтальный.

Температуры, зарегистрированные по высоте обшивки, оказались во всех случаях переменными, увеличиваясь с течением времени в нижней части модели и уменьшаясь в верхней (см. рис. 6). Максимальные значения температур ожидаемо возрастали при увеличении начального содержания горючей жидкости и при уменьшении зазора (см. рис. 7). Тем не менее и при минимальном зазоре из-за недостатка кислорода воздуха температуры не превышали 600 °С, т. е. наибольшую опасность представлял не тепловой эффект, а само распространение горения, скрытое обшивкой.

Изменение содержания горючей жидкости (ее видимое истечение) связывает вертикальный пожар

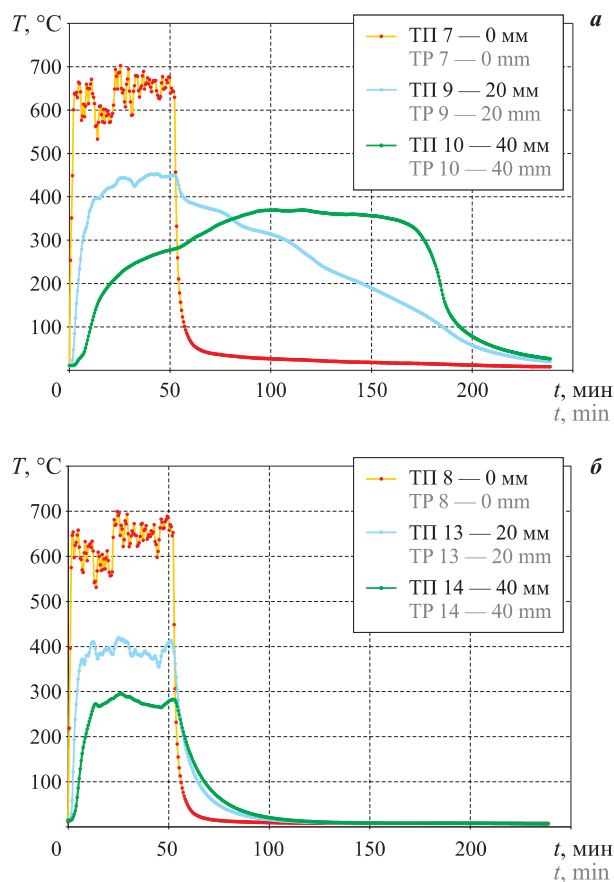


Рис. 9. Изменения температур T по времени t в точках установки термопар (ТП) на разном расстоянии от обшивки, установленных без зазора, для вертикальных образцов минеральной ваты при огневом воздействии на обшивки ($t < 52$ мин) и после воздействия: *a* — образец с проливом дизельного топлива, $E = 50,5 \text{ кг/м}^3$; *b* — сухой образец

Fig. 9. Changes of temperatures T with time t in the points of thermocouple (TP) installation at different distance from sheet, installed without clearance, for vertical samples of mineral wool during point fire impact on sheets ($t < 52$ min) and after impact: *a* — sample with diesel oil spill, $E = 50.5 \text{ kg/m}^3$; *b* — dry sample

пролива с условиями перетока сверху вниз по вертикальному теплоизоляционному слою. Одновременно видимое в зазоре движение парогазовой смеси снизу вверх позволяет предположить, что имеет место и противоток жидкости с газообразными продуктами в теле теплоизоляционного слоя. Это происходит потому, что истечение жидкости освобождает часть объема газопроницаемой минеральной ваты, и она выходит из режима захлебывания. Кроме того, за счет тепла, выделяющегося при горении, жидкость имеет температуру кипения.

Тогда в теле минеральной ваты и на ее поверхности должен проходить массообменный процесс обогащения паров легкими фракциями, содержащимися в исходном нефтепродукте, и процесс обогащения жидкости тяжелыми фракциями, т. е. такой же процесс, как и при обычной периодической ректификации многокомпонентных (непрерывных) сме-

сей в насадочном массообменном аппарате [4]. Здесь еще раз вернемся к зарегистрированным профилям температур (см. рис. 6) и отметим, что на завершающей стадии пожара пролива во всех экспериментах они напоминали изменения температур по высоте ректификационного аппарата. Роль газов (газообразных продуктов горения) в таком случае аналогична роли отпаривающих агентов, способствующих изменению парциального давления при ректификации [11].

Указанные признаки дистилляции и даже ректификации позволяют предположить, что обогащение тяжелыми и легкими фракциями соответственно жидкости и паров может оказывать существенное влияние на сам процесс горения и на вероятность распространения пожара, поскольку высота теплоизоляционного слоя резервуаров многократно превышает его толщину, а рассматриваемые нефтепродукты являются многокомпонентными смесями (широкими фракциями углеводородного сырья).

Таким образом, в верхней части теплоизоляционного слоя пожар будет связан с горением газообразных продуктов, обогащенных легкими фракциями, а в нижней части высокий тепловой эффект будет обусловлен горением истекающей жидкости, обогащенной тяжелыми фракциями.

Последующие исследования касались конструкций, выполненных без зазора. Они выявили принципиальное отличие их от конструкций с зазором, заключающееся в том, что воздействие внешнего источника зажигания не приводило к пламенному горению.

В экспериментах испытывались образцы минеральной ваты с обрешеткой и плотным (без зазоров) расположением обшивок, т. е. образцы выполнялись подобно сэндвич-панелям. Начальное содержание ГЖ в теплоизоляционном слое из минеральной ваты имело различные значения. Пропитку минеральной ваты нефтепродуктами осуществляли так же, как и при испытании конструкций с зазором, но при этом использовали не однократное зажигание, а длительное огневое воздействие на обшивку. В ходе испытаний регистрировали температуру по толщине образцов. После огневого воздействия и охлаждения материалов исследовали повреждения теплоизоляционного слоя.

Контроль температур в ходе испытания и вскрытие образцов после испытания выявили признаки скрытого распространения горения (тления) по минеральной вате, содержащей горючие жидкости.

Для примера на рис. 8 сопоставлены фотографии разрезов образцов, поддерживающих и не поддерживающих тление. Из рисунка видно, что при одинаковом огневом воздействии повреждения образца, пропитанного горючей жидкостью, распро-

странились вглубь (см. рис. 8,а и 8,б), а след теплового воздействия на сухом образце заметно меньше (см. рис. 8,в и 8,з).

Графики температур, представленные на рис. 9, также подтверждают наличие тления пропитанной минеральной ваты. После прекращения внешнего подвода тепла экзотермическая реакция в пропитанном образце продолжалась еще около 2 ч, тогда как температура сухого образца сразу начала снижаться.

Поскольку температуры при тлении не превышали 400 °С, наибольшую опасность представлял не тепловой эффект, а само скрытое распространение горения.

Нагрев образцов и здесь сопровождался видимым снизу усилением истечения жидкости и выходом газообразных продуктов сверху. В случае теплоизоляционного слоя, собранного без зазоров, внутри минеральной ваты также можно предположить наличие условий для дистилляции и даже ректификации нефтепродукта, т. е. условий формирования массообменного процесса с обогащением жидкости тяжелыми углеводородами, а паров — легкими фракциями.

Последнее повышает вероятность трансляции пожара, т. е. возможность возгорания паров вверху теплоизоляционного слоя, тем более что горючесть

газообразных продуктов, покидающих минеральную вату, была подтверждена в ходе испытаний.

Выводы и рекомендации

1. Пропитка теплоизоляционного слоя является доминирующим фактором пожарной опасности конструкций теплоизоляции резервуаров независимо от способа крепления обшивки (с зазором, без зазора).

2. При своевременном прекращении аварии пролива процесс десорбции существенно снижает пожарную нагрузку теплоизоляционного слоя, однако длительное время сохраняется опасность возгорания, особенно в случае пропитки минеральной ваты вязкими нефтепродуктами.

3. Повышение температуры во время пожара пролива приводит к уменьшению вязкости нефтепродуктов, которыми пропитана минеральная вата, в результате чего усиливается десорбция, ускоряется истечение горючей жидкости и становится более вероятным переход вертикального пожара пролива в горизонтальный.

4. Заслуживает внимания и изучения процесс, сопровождающий вертикальный пожар пролива и имеющий признаки дистилляции или ректификации, т. е. процесс обогащения тяжелыми фракциями истекающей жидкости и легкими фракциями газообразных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников В. С., Кириллов С. В., Мельников М. В., Ванин С. А., Васильев В. Г., Потемкин С. А. Минеральная вата — теплоизоляция фасадных и кровельных систем в условиях пожара пролива и тления // Наукоеведение : интернет-журнал. — 2016. — Т. 8, № 6. — 28 с. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/63TVN616.pdf> (дата обращения: 20.09.2017).
2. Филиппова А. Г., Наумкин Е. А., Бакиров И. К. Оценка величины пожарного риска резервуарного парка // Информационные технологии. Проблемы и решения. — 2017. — № 1(4). — С. 39–44. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29300169_98366830.pdf (дата обращения: 15.09.2017).
3. Агеев А. А., Волков В. А., Жигунова Л. К., Зуев А. А. Гидродинамика движения жидкости в капиллярах пористого тела // Вестник МНЭПУ. — 2015. — Т. 7. — С. 8–18. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_27389241_91483895.pdf (дата обращения: 20.09.2017).
4. Александров И. А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования. — 3-е изд., перераб. — М. : Химия, 1978. — 280 с.
5. Лыков А. В. Теория сушки. — М. : Энергия, 1968. — 472 с.
6. Волков В. А., Агеев А. А. Гравитометрический кинетический метод определения параметров капиллярно-пористых тел и новый метод расчета распределения капиллярного пространства по размерам капилляров (на примере текстильных материалов) // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). — 2016. — Т. 12, № 2. — С. 81–87. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_28082530_14681222.pdf (дата обращения: 20.09.2017).
7. Каримов Р. Р., Смирнова Е. А., Передерей О. И. Совершенствование средств и методов пассивного пожаротушения при аварийных проливах нефтепродуктов // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации) : материалы Десятой международной научно-технической конференции. — 2016. — Т. 1. — С. 171–172. URL: <https://www.tyuiu.ru/wp-content/uploads/2016/08/Том-1-GiN-2016.pdf> (дата обращения: 15.09.2017).
8. Швырков С. А., Юрьев Я. И. Температурный режим пожара для определения предела огнестойкости ограждающих стен нефтяных резервуаров // Технологии техносферной безопасности. — 2016. — № 4(68). — С. 50–56. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/20-04-16.ttb.pdf> (дата обращения: 20.09.2017).

9. *Бабичева Л. К., Акмурзина Д. Э.* Тепловая изоляция резервуаров с нефтью и нефтепродуктами // *Аллея науки.* — 2017. — Т. 4, № 9. — С. 283–288. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29656014_27834603.pdf (дата обращения: 20.09.2017).
10. *Мельников В. С., Молоканов Ю. К.* Развитие формулировки ограничений в задаче квадратичного программирования для коррекции материальных балансов химико-технологических подсистем. — М. : ЦИНТИХимнефтемаш, 1984. — 21 с.
11. *Мельников В. С., Молоканов Ю. К., Осинина О. Г.* Угледородные газы как отпаривающий агент в атмосферных колоннах установок АВТ // *Химия и технология топлив и масел.* — 1984. — № 5. — С. 14–16.

Материал поступил в редакцию 25 сентября 2017 г.

Для цитирования: *Мельников В. С., Мельников М. В., Молчанов В. П., Бастриков Д. Л.* Условия пожара пролива нефтепродуктов на теплоизоляцию резервуаров // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety.* — 2017. — Т. 26, № 11. — С. 31–40. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.31-40.

English

CONDITIONS OF PETROLEUM PRODUCTS SPILL FIRE ON THE HEAT INSULATION OF TANKS

MELNIKOV V. S., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, International Fire Center (Kolomenskiy Proezd, 14, Moscow, 115446, Russian Federation; e-mail: melnikov@firecenter.ru)

MELNIKOV M. V., Specialist, International Fire Center (Kolomenskiy Proezd, 14, Moscow, 115446, Russian Federation)

MOLCHANOV V. P., Doctor of Technical Sciences, Professor of General and Special Chemistry Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

BASTRIKOV D. L., Candidate of Technical Sciences, Director of Department of Industrial and Fire Safety of Hazardous Production Facilities, International Fire Center (Kolomenskiy Proezd, 14, Moscow, 115446, Russian Federation; e-mail: dlbatrikov@mail.ru)

ABSTRACT

Tanks, pipelines and other items are often made using heat insulation from mineral wool, which is made of non-organic fibers and binding to provide operational properties, including hydrophobic property related to water. However this technology does not protect from wetting by many other fluids and mineral is good in absorbing oil, petroleum products (motor oils, lubricants, solvents, anti-freezes etc.). This is why fire safety of combustible fluids spill on building structures with heat insulating layer from mineral wool is connected with possible fire spreading.

In order to study conditions under which spill fire is developed along vertical structures of cylindrical oil and oil products tanks, fire tests and experiments were conducted on cold hydraulic rig. For physical modeling of the accident and spill fire, heat insulating layer gasoline and motor oil dip were used. Depending on the location of tank shell relative to heat insulating layer, fire propagation in the ventilated gap and smoldering without gap were studied. For all constructive solutions a certain heat effect was observed, but it has been indicated that concealed burning propagation is the ultimate danger. Data for the evaluation of the residual content of petroleum products in the heat insulating layer depending on the time after spill fire accident was obtained, this data is suggested to be used to forecast duration and intensity of spill fire. Factors characterizing product viscosity of petroleum product and dependence of viscosity from temperature were referred to as dominant. Signs of petroleum products distillation and rectification processes, which may accompany vertical spill fire and facilitate to the propagation of combustion of gaseous products in the top of heat insulating layer as well as combustion of heavy fractions in its lower part. Conclusions were drawn that with timely cessation of spill accident, desorption process significantly reduces fire load on heat insulating layer, but ignition hazard is present for a long time, especially in the cases when mineral wool is impregnated with viscous oil products. It was also noted, that increase in temperature during spill fire leads to

the decrease in oil products viscosity, with which mineral wool is impregnated, and as a result desorption is enhanced, leakage of flammable liquid speeds up and transition of vertical spill fire into horizontal becomes more probable.

Keywords: spill fire; tank; heat insulation; mineral wool; fire hazard; smoldering; propagation of combustion; impregnation; petroleum products; fire tests; distillation; rectification; hydraulic tests; sorption; desorption; outflow; sorption tank; combustible liquid content; fire load.

REFERENCES

1. Melnikov V. S., Kirillov S. V., Melnikov M. V., Vanin S. A., Vasilev V. G., Potemkin S. A. Mineral wool — heat insulation of facade and roofing systems in conditions of spillage fire and smoldering. *Naukovedenie. Internet-zhurnal / Science of Science. Scientific Open Access Journal*, 2016, vol. 8, no. 6. 28 p. (in Russian). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/63TVN616.pdf> (Accessed 20 September 2017).
2. Filippova A. G., Naumkin E. A., Bakirov I. K. Estimate the value of the tank farm fire risk. *Informatsionnyye tekhnologii. Problemy i resheniya / Information Technologies. Problems and Solutions*, 2017, no. 1(4), pp. 39–44 (in Russian). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_29300169_98366830.pdf (Accessed 15 September 2017).
3. Ageev A. A., Volkov V. A., Zhigunova L. K., Zuev A. A. The hydrodynamics of the fluid in the capillaries of the porous body. *Vestnik MNEPU / Bulletin of MNEPU*, 2015, vol. 7, pp. 8–18 (in Russian). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_27389241_91483895.pdf (Accessed 20 September 2017).
4. Aleksandrov I. A. *Rektifikatsionnyye i absorbtionnyye apparaty. Metody rascheta i osnovy konstruirovaniya* [Rectification and absorption apparatus. Methods of calculation and the basics of construction]. 3rd ed. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 280 p. (in Russian).
5. Lykov A. V. *Teoriya sushki* [Theory of drying]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p. (in Russian).
6. Volkov V. A., Ageev A. A. Parameters capillary-porous bodies and the new method of calculating distribution capillary space on the size of capillaries (on the example of textile materials). *Wschodnio-europejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 81–87 (in Russian). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_28082530_14681222.pdf (Accessed 20 September 2017).
7. Karimov R. R., Smirnova E. A., Perederey O. I. Perfection of means and methods of passive fire extinguishing in emergency oil spills. In: *Geologiya i neftegazonosnost Zapadno-Sibirskogo megabasseyna (opyt, innovatsii). Materialy Desyatoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Geology and oil-and-gas content of the West Siberian megabasin (experience, innovation). Proceedings of Tenth International Scientific and Technical Conference, 2016, vol. 1, pp. 171–172 (in Russian). Available at: <https://www.tyuiu.ru/wp-content/uploads/2016/08/Tom-1-GiN-2016.pdf> (Accessed 15 September 2017).
8. Shvyrkov S. A., Yuryev Ya. I. The temperature of the fire to determine the limit of fire resistance of enclosing walls of oil tanks. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2016, no. 4(68), pp. 50–56 (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/20-04-16.ttb.pdf> (Accessed 20 September 2017).
9. Babicheva L. K., Akmurzina D. E. Thermal insulation of tanks with oil and petroleum products. *Alleya nauki / Alley of Science*, 2017, vol. 4, no. 9, pp. 283–288 (in Russian). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_29656014_27834603.pdf (Accessed 20 September 2017).
10. Melnikov V. S., Molokanov Yu. K. *Razvitiye formulirovki ogranicheniy v zadache kvadrachnogo programmirovaniya dlya korrektsii materialnykh balansov khimiko-tekhnologicheskikh podsystem* [Development of the formulation of constraints in the problem of quadratic programming for the correction of material balances of chemical and technological subsystems]. Moscow, TsINTIKhimneftemash Publ., 1984. 21 p. (in Russian).
11. Melnikov V. S., Molokanov Yu. K., Osinina O. G. Hydrocarbon gases as a stripping agent in atmospheric columns of AVT plants. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel / Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 1984, no. 5, pp. 14–16 (in Russian).

For citation: Melnikov V. S., Melnikov M. V., Molchanov V. P., Batrikov D. L. Conditions of petroleum products spill fire on the heat insulation of tanks. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 11, pp. 31–40 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.31-40.