

УДК 54-14.537.22

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ РЕЗЕРВУАРОВ ДИЗЕЛЬНЫМ ТОПЛИВОМ

Тютяев А.В., Должиков А.С., Зверева И.С.

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»,
Самара, e-mail: tyutyayev@mail.ru

Известно немало случаев воспламенения и взрыва при операциях заполнения и слива нефтепродуктов в резервуары и автоцистерны, в особенности дизельного топлива и бензинов. Чаще всего, воспламенение нефтепродуктов происходит из-за разряда статического электричества даже при исправной системе заземления технологического оборудования и резервуаров. В работе были проведены хроматографические и спектральные исследования для определения фракционного состава нефтепродуктов, исследовано наличие разного вида добавок к дизельному топливу, проанализированы легколетучие примеси к топливу и его основные компоненты. Установлено, что наличие даже небольшого количества летучих фракций в исследуемых резервуарах повышает вероятность их воспламенения и требует определения концентрации легколетучих нефтепродуктов. Получена зависимость степени электризации и вероятности воспламенения от скорости заполнения при различных температурах нефтепродуктов.

Ключевые слова: нефтепродукты, заполнение резервуаров, взрывоопасность, воспламенение, концентрация паров

RESEARCHES THE CAUSES OF GAS-AIR PETROLEUM PRODUCTS MIXTURE IGNITION AT DIESEL FUEL FILLING TANKS

Tyutyayev A.V., Dolzhikov A.S., Zvereva I.S.

Samara state technical university, Samara, e-mail: tyutyayev@mail.ru

There are many cases of ignition and explosion during operations filling and draining of oil in tanks and trucks, in particular diesel fuel and gasoline. Most often, inflammation of oil is due to static electricity, even with an intact ground system processing equipment and tanks. The work was carried out chromatographic and spectroscopic studies to determine the fractional composition of the oil, investigated the presence of various types of additives to diesel fuel, analyzed volatile impurities to the fuel and its major components. That the presence of even a small amount of volatile fractions in the test tank increases the likelihood of ignition and requires the determination of the concentration of volatile petroleum products. The dependence of the degree of electrification, and the probability of ignition of fill rates at various temperatures of petroleum products.

Keywords: oil, filling tanks, explosion, ignition, the vapor concentration

В настоящее время существует проблема обеспечения надежности эксплуатации и безаварийности работы систем хранения и распределения углеводородных топлив различного назначения. Одной из основных причин возникновения взрывов и пожаров в резервуарах и автоцистернах для перевозки является аккумуляция зарядов статического электричества, образующихся в трубопроводе и резервуарах в процессе транспортировки [1-3]. Вносимые вместе с топливом в резервуар электростатические заряды создают электрическое поле и, соответственно, условия для возникновения искрового пробоя газового пространства над поверхностью продукта.

Сложившиеся на сегодняшний день представления о причинах взрывов и пожаров при операциях налива топлива в цистерны требуют существенных дополнений и уточнений, в том числе количественных оценок основных физических процессов, протекающих при этих операциях, особенно процессов накопления статического электричества.

Например, с помощью метода спектрального анализа в инфракрасной области спектра можно надежно идентифицировать отличие разных видов дизельного топлива, устанавливать факт добавки к дизельному топливу различных компонентов и устанавливать процентный состав полученной смеси. По наличию спектральных линий отдельных компонентов можно судить о присутствии в дизельном топливе фракций бензина, что может способствовать образованию взрывоопасной концентрации паровоздушной смеси или примесей, способствующих электризации топлива.

Степень электризации жидких диэлектрических материалов определяется величинами диэлектрической проницаемости и поверхностным омическим сопротивлением, при этом диэлектрическая проницаемость определяет расположение материала к тому или другому знаку потенциала, а поверхностное сопротивление характеризует скорость стекания заряда с диэлектрика через воздух или заземление [3-9].

Таким образом, при соприкосновении нефтепродуктов стенка наливной (сливной) трубы оказывается заряженной электрическим зарядом одного знака, а продукт, непосредственно прилегающий к трубе, равным зарядом противоположного знака.

В качестве исходных данных для расчета предельно допустимого значения плотности заряда используются следующие величины:

W_{\min} – минимальная энергия зажигания среды над поверхностью жидкости, Дж;

ε – диэлектрическая проницаемость жидкости;

σ – поверхностное натяжение жидкости, кг/см²;

$\tau = \varepsilon_0 \varepsilon R_v$ – время релаксации заряда в жидкости, с;

ε_0 – электрическая постоянная, равная $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

R_v – удельное объемное электрическое сопротивление жидкости, Ом·м.

При расчете должно использоваться значение W_{\min} для паров данной жидкости при температуре, реализуемой в резервуаре, в который поступает жидкость из трубопровода.

Если отсутствуют необходимые данные о минимальной энергии зажигания, то их необходимо определить экспериментально.

Предельно допустимое значение плотности заряда в Кл/м³ рассчитывается по формулам:

$$q_{ng} = 9 \cdot 10^{-10} W_{\min}^{1/4} \cdot \exp\left(-\frac{\xi}{4}\right); \quad (1)$$

$$\xi = -45,01 + \ln \varepsilon \sqrt{\frac{\sigma}{\tau}}. \quad (2)$$

Указанные соотношения позволяют провести оценку плотности заряда, причём с учётом того, что всё необходимое оборудование надёжно заземлено. Следует однако отметить, что при низких температурах следует ожидать заметного увеличения времени релаксации заряда из-за повышения удельного сопротивления жидкости.

Возможность интенсивной электризации жидкостей при транспортировании их по трубопроводам определяется главным образом скоростью и удельным объемным электрическим сопротивлением [4].

В связи с тем, что удельное объемное электрическое сопротивление жидкости сильно зависит от содержания и состава растворенных в них примесей (т.е. от технологии их получения, способа и степени очистки), при оценке возможности электризации их в каком-либо производстве желательно ориентироваться на значение этого

параметра, полученное при измерениях, проведенных с пробами, отобранными из аппаратов и магистралей этого производства. При использовании данных, заимствованных из литературных источников, следует пользоваться наибольшим из приводимых значений.

Жидкости с удельным объемным электрическим сопротивлением менее 10^5 Ом·м практически не электризуются, и их транспортировка со скоростями до 10 м/с заведомо безопасна.

Электризация, способная привести к возникновению искровых разрядов, для жидкостей с удельным объемным электрическим сопротивлением до 10^9 Ом·м исключена при транспортировке их по трубопроводам со скоростями до 5 м/с.

Для жидкостей, имеющих удельное объемное электрическое сопротивление более 10^9 Ом·м, максимальные безопасные скорости транспортировки по трубопроводам и допустимые скорости истечения в аппараты и резервуары различных форм и размеров из различных загрузочных патрубков должны рассчитываться в каждом отдельном случае и могут быть определены по приведённой ниже методике. При этом ограничение скорости транспортировки максимальным безопасным значением исключает возникновение опасных разрядов в любом заполняемом аппарате (резервуаре) при любом способе подачи жидкости, исключаящем разбрызгивание. Ограничение значения скорости потока в трубопроводе допустимой скоростью истечения исключает опасные разряды только при данном способе подачи жидкости в аппарат (резервуар) данных форм и размеров.

Максимальная безопасная скорость транспортировки жидкости по трубопроводу определяется исходя из необходимости ограничить предельно допустимым значением плотность заряда в потоке, движущемся по данному трубопроводу.

В качестве исходных данных для расчета максимальной безопасной скорости транспортировки жидкостей по трубопроводу используются следующие величины:

r_0 – радиус трубопровода, м;

n – кинематическая вязкость жидкости, м²/с;

ε – диэлектрическая проницаемость жидкости;

T – температура жидкости в трубопроводе, К;

a – коэффициент, учитывающий влияние мелкодисперсных примесей;

$q_{n.g}$ – предельно допустимое значение плотности заряда в жидкости, Кл/м³.

Радиус трубы r_0 определяется как половина условного прохода. Кинематическая

вязкость жидкости и диэлектрическая проницаемость ϵ могут заимствоваться из справочной литературы или непосредственно измеряться при температуре, равной температуре жидкости в трубе.

Значение коэффициента α – содержание механических примесей, заведомо невелико, принимают $\alpha = 1,1$ для жидких углеводородов и для светлых нефтепродуктов.

Максимальная безопасная скорость транспортировки жидкости по трубопроводу (м/с) может быть рассчитана аналитически по формуле:

$$V_{\delta} = \left[\frac{q_{n/g} \cdot v^{5/8} \cdot r_0^{9/8}}{0,55 \cdot 10^{-13} \cdot \alpha \cdot \epsilon T} \right]. \quad (3)$$

Допустимая скорость истечения жидкости в резервуар определяется исходя из необходимости ограничить предельно допустимым значением максимально возможную плотность заряда в приповерхностном слое жидкости, находящейся в заполняемой ёмкости, при данном способе загрузки.

Предельно допустимое значение плотности заряда определяется как плотность заряда в объеме жидкости, при которой вероятность возникновения разряда с энергией, равной 0,25 минимальной энергии зажигания смеси паров этой жидкости с воздухом, не превосходит 10^{-3} .

Если над поверхностью жидкости в заполняемом резервуаре возможно присутствие других горючих паров и газов, в качестве предельно допустимого принимается такое значение плотности заряда, при котором вероятность возникновения разряда с энергией, равной 0,25 наименьшей из минимальных энергий зажигания смесей этих паров и газов с воздухом, не превышает 10^{-3} .

В качестве дополнительных исходных данных для расчета допустимой скорости истечения жидкости из трубопровода в резервуар (загрузочный патрубок вертикальный, расстояние от его конца до дна не более 200 мм) используются следующие величины: диаметр цилиндрического аппарата (резервуара), м; расстояние от стенки аппарата (резервуара) до загрузочного патрубка (в долях к диаметру).

Кинематическая вязкость жидкости, диэлектрическая проницаемость жидкости и предельно допустимое значение плотности заряда в жидкости определяются, как указано ранее.

Удельное объемное электрическое сопротивление жидкости должно определяться путем непосредственных измерений согласно ГОСТ 6581-75 с пробами, отобранными из данного аппарата (резервуара). В случае невозможности осуществления

таких измерений для расчета может быть использовано наибольшее из приводимых в справочниках значений.

Расчет допустимой скорости истечения жидкости из трубопроводов, имеющих условный проход от 40 до 200 мм, в емкость со сферическим, эллиптическим или коническим днищем (при условии, что загрузочный патрубок вертикален, расстояние от его конца до дна не превосходит 200 мм) осуществляется графоаналитическим методом с помощью аппроксимации имеющихся в литературе номограмм.

По вышеприведенной методике в формате Excel создан расчётный модуль, в котором можно определить предельную плотность заряда, безопасную скорость движения жидкости по трубе системы налива и допустимую скорость заполнения автоцистерны.

Для обеспечения пожарной безопасности процесса налива в бензовоз дизтоплив решающее значение имеет предотвращение образования горючей паровоздушной концентрации. Необходимым условием воспламенения горючей смеси является образование горючей концентрации. При неподвижном уровне жидкости концентрация в паровоздушном объеме C_s . Эта концентрация определяется давлением насыщенного пара P_s и общим (атмосферным барометрическим) давлением P_o в свободном объеме резервуара:

$$C_s = P_s / P_o.$$

Таким образом, опасность образования горючей концентрации при хранении нефти в резервуарах может быть оценена выражением:

$$C_{\text{НПВ}} \leq C_s \leq C_{\text{ВПВ}}, \quad (4)$$

где C_s – рабочая (фактическая) концентрация паров жидкости в резервуаре; $C_{\text{НПВ}}$ и $C_{\text{ВПВ}}$ – соответственно нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения (распространения пламени).

Концентрационные пределы воспламенения для жидкостей приведены в справочниках. Они могут быть также определены экспериментально или расчетным путем. Концентрация паров жидкости в резервуаре зависит от $T_{\text{жсн}}$, т.е. от её компонентного состава, и от T – температуры жидкости. Условие опасности (4) может быть применимо для оценки возможности образования горючей концентрации в резервуарах с неподвижным уровнем жидкости, когда в них образуется насыщенная концентрация паров. Это условие остается справедливым при наполнении, если подъем уровня жидкости в резервуарах с дыхательными устройства-

ми происходит достаточно медленно и не изменяет насыщенную концентрацию паровоздушной смеси непосредственно над зеркалом жидкости. При опорожнении таких резервуаров состояние насыщения газового пространства парами жидкости нарушается за счет поступления через дыхательную арматуру дополнительного количества воздуха. Концентрация при этом уменьшается, и в процессе или при завершении откачки она может быть взрывоопасной.

Таким образом, необходима достоверная модель распределения паров топлива во времени и пространстве в течение всего времени длительности операции слива-налива. Однако процесс можно рассмотреть поэтапно: испарение и накопление паров топлива в цистерне, диффузия паров из открытой наливной горловины и вытеснение паровоздушной смеси при заполнении цистерны.

В закрытом резервуаре при состоянии термодинамического равновесия концентрация паров характеризуется давлением насыщенных паров.

Можно приближённо определить время установления равновесной концентрации на расстоянии r :

$$t = r^2/D.$$

Если $r = 2$ м, $D = 0,008$ м²/с (бензин), получаем $t = 250$ с.

Приведённая оценка показывает, что время выравнивания концентраций на расстоянии 2 м равно примерно 4 мин. Это также означает, что при открытом наливном отверстии всегда найдутся области пространства цистерны в её верхней части, где концентрация паров будет взрывоопасной, несмотря на то, что концентрация в состоянии насыщения значительно превышает взрывоопасную.

Кроме того, выполненная оценка является существенно заниженной, так как при низких температурах скорость диффузионных процессов, определяющих процесс выравнивания концентраций, заметно снижается.

Список литературы

1. Глебов В.С., Тазеев Г.С. Пожарная безопасность нефтебаз и объектов магистральных трубопроводов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1972. – 192 с.
2. Максимов Б.К., Обух А.А. Статическое электричество в промышленности и защита от него. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 96 с.
3. Прибылов В.Н., Черный Л.Т. Электризация диэлектрических жидкостей при течении по трубам // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1979. – № 6. – С. 42–47.
4. РТМ 6-28-007-78. Допустимые скорости движения по трубопроводам и истечения в ёмкости (аппараты, резервуары).

5. Прибылов В.Н., Макаров В.Н. Электризация органических жидкостей при постоянной скорости потока // Вестник Моск. ун-та, сер. Математика и механика. – 1998. – № 4. – С. 50–53.

6. Кицис С.И., Путко А.Э. Методика расчета нефти в трубопроводах по значению концентрации потенциалосодержащих ионов // Нефтепромышленное дело. – 2005. – № 10. – С. 52–59.

7. Путко А.Э., Кицис С.И. Физические основы явления электризации нефти в нефтепромышленных трубах // Материалы междунауч.-техн.конфер. посвященной 40-летию Тюменского нефтегазового университета. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – Т.2. – С. 91–92.

8. Кицис С.И., Путко А.Э. Пристеночный электрический ток, возникающий при электризации нефти в трубопроводе // Нефть и газ Западной Сибири: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 40-летию Тюменского нефтегазового университета (Индустрального института). Т.2 – Тюмень, ТюмГНГУ, 2003. – С. 93–94.

9. Путко А.Э. Разработка методов расчета процессов электризации нефти в трубопроводах и хранилищах цилиндрического типа: автореф. дис. ... – Тюмень, ТюмГНГУ, 2006.

References

1. Glebov V.C., Tazeev G.S. *Pozharnaja bezopasnost' neftebaz i ob'ektov magistral'nyh truboprovodov. Izdanie 2-e, pererabotannoe i dopolnennoe.* М.:Nedra, 1972, pp. 192.
2. Maksimov B.K., Obuh A.A. *Sticheskoje jelektrichestvo v promyshlennosti i zashhita ot nego.- Jenergoatomizdat*, 2000, pp. 96.
3. Pribylov V.N., Chernyj L.T. *Elektrizacija dijelektricheskikh zhidkostej pri techenii po trubam- Izv. AN SSSR. MZhG.* 1979, no. 6, pp. 42–47.
4. РТМ 6-28-007-78. *Dopustimye skorosti dvizhenija po truboprovodam i istechenija v jomkosti (apparaty, rezervuary).*
5. Pribylov V.N., Makarov V.N. *Elektrizacija organicheskikh zhidkostej pri postojannoju skorosti potoka-Vestnik Moskovskogo universiteta, ser. Matematika i mehanika*, 1998, no. 4, pp. 50–53.
6. Kicis S.I., Putko A.Je. *Metodika rascheta nefi v truboprovodah po znacheniju koncentracii potencialosoderzhashhij ionov- Neftpromyslovoe delo*, 2005, no. 10, pp. 52–59.
7. Putko A.Je., Kicis S.I. *Fizicheskie osnovy javlenija jelektrizacii nefi v neftepromyslovyh trubah. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii posvjashhennoj 40-letiju Tjumenskogo neftegazovogo universiteta.* Tjumen': TjumGNGU, 2003, T.2, pp.91-92.
8. Kicis S.I., Putko A.Je. *Pristenochnyj jelektricheskij tok, vznikajushhij pri jelektrizacii nefi v truboprovode. Nefi i gaz Zapadnoj Sibiri. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii, posvjashhennoj 40-letiju Tjumenskogo neftegazovogo universiteta (Industriial'nogo instituta).* Tjumen', TjumGNGU, 2003, T.2, pp. 93–94.
9. Putko A.Je. *Razrabotka metodov rascheta processov jelektrizacii nefi v truboprovodah i hranilishhah cilindricheskogo tipa.* Avtoreferat dissertacii, Tjumen', TjumGNGU, 2006.

Рецензенты:

Требунских В.П., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Защита в чрезвычайных ситуациях» Самарского государственного технического университета, г. Самара;

Кривченко А.Л., д.т.н., профессор кафедры «Защита в чрезвычайных ситуациях» Самарского государственного технического университета, г. Самара.

Работа поступила в редакцию 07.05.2013.