

Общие сведения о статическом электричестве в некоторых производственных операциях с нефтепродуктами

И.С. Таубкин

Федеральное бюджетное учреждение Российский федеральный центр судебной экспертизы при Министерстве юстиции Российской Федерации, Москва 109028, Россия

Аннотация. Пожары и взрывы паров нефтепродуктов от разрядов статического электричества происходят довольно часто при различных технологических операциях. Исследование версий об их причастности к авариям весьма трудоемко и относится к числу наиболее сложных процедур. Цель работы – предоставить судебным экспертам общие сведения о механизмах возникновения электростатических зарядов у жидкостей и твердых тел, а также о производственных операциях с нефтепродуктами, в ходе которых могут возникать разряды статического электричества, приводящие к воспламенению паров нефтепродуктов.

Ключевые слова: нефтепродукты, налив, распыление, оседание, персонал, статическое электричество, механизмы, заряды, разряды, резервуары, автоцистерны, танкеры, пожар, взрыв

Для цитирования: Таубкин И.С. Общие сведения о статическом электричестве в некоторых производственных операциях с нефтепродуктами // Теория и практика судебной экспертизы. 2018. Том 13. № 2. С. 54–64. DOI: 10.30764/1819-2785-2018-13-2-54-64

Overview of Static Electricity in Some Industrial Operations with Petroleum Products

Igor' S. Taubkin

The Russian Federal Centre of Forensic Science of the Ministry of Justice of the Russian Federation, Moscow 109028, Russia

Abstract. Fires and explosions of petroleum products vapors triggered by static electricity discharges are not uncommon during various technological operations. Investigation of their role in accidents is one of the more labor intensive and complicated forensic tasks. The purpose of this work is to provide forensic experts with general information on electrostatic charging mechanisms in liquids and solids, as well as on production operations with petroleum products where static electricity may occur, leading to the ignition of their vapors.

Keywords: petroleum products, loading, spraying, settling, personnel, static electricity, mechanisms, charges, discharges, tanks, tankers, fire, explosion

For citation: Taubkin I.S. Overview of Static Electricity in Some Industrial Operations with Petroleum Products. *Theory and Practice of Forensic Science*. 2018. Vol 13. No 2. P. 54–64. (In Russ.) DOI: 10.30764/1819-2785-2018-13-2-54-64

Судебно-экспертная практика свидетельствует о значительном количестве пожаров и взрывов паров нефтепродуктов от разрядов статического электричества при различных технологических операциях.

Термин «статическое электричество» первоначально относился к физическим явлениям, связанным с покоящимися за-

рядами, например, в заряженных изолированных проводниках. Однако электростатические заряды могут как находиться в покое, так и двигаться. В работе Л. Лёба 1963 года [1, с. 14] приведена следующая характеристика этого физического явления: «Статическая электризация охватывает все процессы, ведущие к образованию и

разделению положительных и отрицательных электрических зарядов в результате механической деформации, имеющей место при столкновении или контакте поверхностей двух твердых тел, поверхностей твердого тела и жидкости, а также при разрыве или отделении поверхностей твердых тел или жидкости газами или каким-либо другим агентом, в частности ионизированными газами. Сюда следует отнести такие процессы, как контактная электризация, явления трибоэлектричества, электризация при разбрызгивании, электризация порошков, снега и, наконец, электризация, имеющая место во время грозы».

Согласно ГОСТ 12.1.018-93¹ статическое электричество представляет собой совокупность явлений, связанных с возникновением, сохранением и релаксацией свободного электрического заряда на поверхности или в объеме диэлектриков или на изолированных проводниках.

Различные теории возникновения электростатических зарядов основываются на понятии о двойных электрических слоях на границах фаз твердых и жидких веществ и материалов. Следует особо отметить, что эти слои, принадлежащие только твердой или жидкой фазе, образуются в том числе и на границе соприкосновения твердых или жидких фаз с газами [1–4].

Так называемый двойной слой Гельмгольца, получивший название в честь немецкого физика (Ludwig Ferdinand von Helmholtz), – это тонкий слой, сформированный двумя пространственно разделенными слоями электрических зарядов противоположного знака, образующих, подобно обкладкам плоского конденсатора, электрическую емкость, величина которой зависит от расстояния между указанными слоями зарядов [4].

В «Физическом словаре» под ред. П.Н. Беликова [5] приведено следующее пояснение к возникновению двойного слоя. Этот слой «...своего рода микроконденсатор, образованный зарядами противоположных знаков ионной или ионно-электронной природы вблизи поверхности раздела двух фаз. Так, например, этот слой образуется на границе металл – окружающая среда; при помещении металла в достаточно разбавленный раствор его ионов металл отдает ионы в раствор, а

сам заряжается отрицательно остающимися свободными электронами. Перешедшие в раствор ионы притягиваются противоположно заряженной поверхностью металла, образуя на небольшом расстоянии от него вторую обкладку конденсатора. Возникновение и разрушение такого двойного слоя при образовании замкнутой цепи дает нам картину возникновения ЭДС и тока в электролитах (в гальванических элементах)».

По современным данным, возникновение электростатических зарядов обусловлено не одним основным механизмом, а рядом различных процессов и сопутствующих им явлений. Не вдаваясь детально в теорию механизмов и явлений, приводящих к возникновению зарядов статического электричества (СЭ) в жидкостях, рассмотрим реализацию их проявлений в инженерной практике осуществления процессов слива-налива.

Электризация жидкостей Электризация жидкостей при движении

Движение диэлектрических жидкостей вдоль твердой поверхности, например по стенкам труб, в определенных условиях может сопровождаться интенсивной электризацией. Если удельное объемное электрическое сопротивление жидкости (ρ) превышает 10^{10} Ом·м, электризация легко воспламеняющихся жидкостей создает опасность воспламенения смесей их паров с воздухом от разрядов статического электричества [6, 7]. В работе [1] пограничным считается значение ρ , равное 10^9 Ом·м. На границе раздела жидкой и твердой фазы за счет электрокинетических явлений, как отмечалось выше, происходит образование двойного электрического слоя. Основа механизма этого процесса – электролитические, обусловленные переходом ионов через межфазную границу веществ и материалов, начиная от процессов, лежащих в основе действия гальванического элемента, и кончая процессами, которые ведут к образованию двойных слоев Гельмгольца на поверхности металлов или других материалов при контакте с жидкостями [1].

Упрощенная картина распределения зарядов в пограничной зоне жидкость – стенка трубопровода представлена на рисунке 1 [7].

Механизм электризации жидкости, движущейся по трубе, т. е. приобретения ею электрического заряда, объясняется

¹ ГОСТ 12.1.018-93. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования.

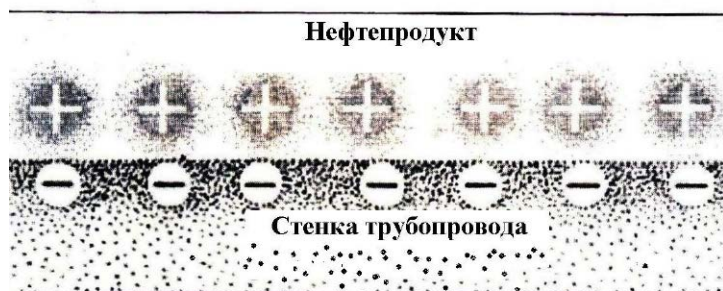


Рис. 1. Простейшая модель двойного электрического слоя
Fig. 1. Basic model of an electrical double layer

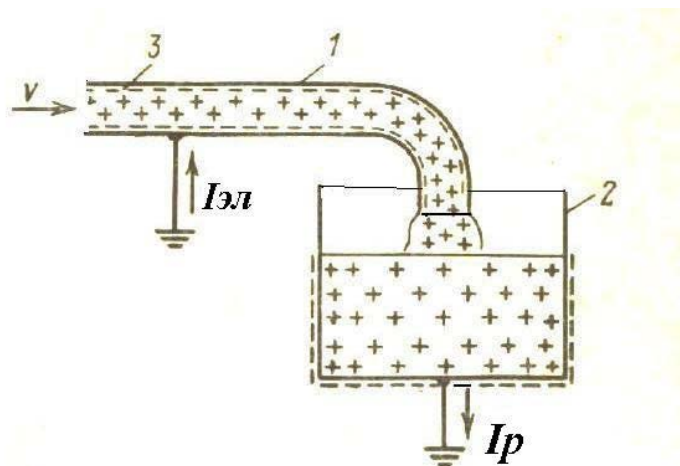


Рис. 2. Электризация жидкости при ее движении по трубопроводу со скоростью V [7]: 1 – трубопровод; 2 – приемный резервуар; 3 – жидкость
Fig. 2. Electrostatic charging of liquid flowing through a pipe at velocity V [7]: 1 – pipe; 2 – receiving tank; 3 – liquid

механическим разрушением этого слоя. При этом заряды одного знака остаются на стенке трубы, а заряды противоположного знака, находящиеся в объеме жидкости, увлекаются ее потоком и попадают в емкости различного назначения (резервуары, емкостные аппараты, цистерны), в которые транспортируется жидкость. Если трубу, по которой движется жидкость, изолировать от земли и подключить к измерителю тока, то последний зафиксирует его некоторое значение (рис. 2). Этот ток называется током электризации.

Зная значение этого тока $I_{эл}$ (мкА) и расход жидкости G (м³/с) в трубе, можно определить объемную плотность электростатического заряда ρ_v , попадаемого в резервуар, по следующей формуле:

$$\rho_v = \frac{I_{эл}}{G} \text{ мкКл/м}^3$$

Ток, зафиксированный прибором в цепи «резервуар-земля», называется током релаксации электростатических зарядов (I_p).

Объемная плотность заряда статического электричества жидкости, прокачиваемой по трубопроводу, определяется физическими свойствами жидкости (удельным объемным сопротивлением, диэлектрической проницаемостью, вязкостью и др.), скоростью ее движения, диаметром и материалом трубопровода и рядом других факторов. Вместе с тем отметим, что особенно интенсивно электризуются жидкости при фильтрации² [7–9].

Электризация легковоспламеняющихся жидкостей при движении по трубопроводу, а также через фильтры и другое технологическое оборудование не представляет пожарной опасности, если указанное оборудование заземлено, а в емкостях сливно-наливной системы концентрация паровоздушной смеси находится вне пределов ее воспламенения. Опасность возникновения пожаров и взрывов от разрядов СЭ возникает при заполнении емкостей, когда над поверхностью подаваемой в них жидкости находится легковоспламеняемая смесь ее

паров с воздухом в концентрации в пределах воспламенения, а заряды СЭ создают сильное электрическое поле. В этом случае между поверхностью наэлектризованной жидкости и стенками резервуара или другими заземленными элементами его конструкции возможно возникновение импульсных электрических разрядов и, как следствие, воспламенение паров жидкости. Эти разряды также могут возникать с плавающих на поверхности жидкостей предметов. Таким образом, опасность проявления разрядов статического электричества при сливе и наливке емкостей различного назначения (резервуаров, автоцистерн и ж/д цистерн, грузовых отсеков танкеров, баков автомашин, канистр и др.) диэлектрических жидкостей обусловлена следующим³ [2, 3, 7–11]:

² API RP 2003. Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning, and Stray Currents. BALLOT DRAFT 4-10-2006.

³ D 4865-98 (Reapproved 2003). ASTM. Standard Guide for Generation and Dissipation of Static Electricity in Petroleum Fuel Systems.

1. Возникновением двойного слоя электрических зарядов на границе раздела жидкость – твердое тело, или жидкость – стенка трубопровода.

2. Электризацией жидкости в результате разделения этого двойного слоя, вызванного движением жидкости по трубопроводу с определенной скоростью, и, как следствие, уносом жидкостью зарядов одного знака, возникших в ней на границе раздела жидкость – стенка трубопровода. Генерирование заряда является результатом возникновения электростатических зарядов в жидкости, поскольку во время течения потока жидкости происходит разделение и распределение этим потоком ионов противоположных знаков.

3. Скоплением жидкости с униполярным зарядом в приемной емкости (цистерне, резервуаре и т. п.) и образованием в ней электрического поля. Таким образом, аккумулярование заряда – процесс нарастания электростатических зарядов в наполняемой емкости или в самой жидкости вследствие того, что скорость рассеивания заряда ниже скорости поступления зарядов, привносимых поступающим нефтепродуктом.

4. Релаксацией зарядов жидкости за счет ее проводимости и диэлектрической проницаемости. Заряд, внесенный потоком жидкости в резервуар, сохраняется в нем в течение его релаксации, длительность которой зависит от электропроводности и диэлектрической проницаемости жидкости. Иначе говоря, релаксация электростатического заряда представляет собой процесс его ослабления, затухания с течением времени.

5. Импульсными электрическими разрядами в газовой фазе приемной емкости, передающимися с поверхности жидкости на стенки емкости или поверхности ее выступающих конструктивных элементов (корпусов, датчиков, ребер жесткости и др.). Это происходит одновременно с процессами релаксации зарядов СЭ. Эти разряды возникают, когда напряженность электрического поля в емкости превышает некоторое пороговое значение. Во многих источниках эти разряды называют условно-искровыми, не подразделяя на виды.

Следует особо отметить, что если наливная труба и наполняемый нефтепродуктом резервуар не заземлены, заряды, возникающие и остающиеся на их стенках

некоторое время, могут обусловить разряд статического электричества с их поверхности на окружающие предметы и на человека.

Как известно, заземление представляет собой процесс соединения одного или более токопроводящих объектов с землей таким образом, чтобы все они обладали нулевым электрическим потенциалом⁴. Применительно к транспортировке углеводородных жидкостей это достигается обеспечением непрерывности электроцепи между системой транспортировки, хранения и перегрузки топлива (системой топливоподдачи) и землей, чтобы гарантировать, что данная система характеризуется нулевым потенциалом⁵. Следует особо отметить, что нефтепродукты с проводимостью более 50 пСм/м не накапливают электрический заряд при условии, что они наливаются в заземленную и электропроводящую емкость⁶.

Электризация жидкостей при их распылении

При дроблении жидкостей, особенно при их распылении, также возникают электрические заряды. Под распылением жидкостей понимается процесс распада струи, вытекающей из форсунки или сопла, на капли и дальнейшее их дробление на более мелкие под воздействием внешних (аэродинамических) и внутренних (инерционных и молекулярных) сил [12].

Появление электрических зарядов в этих процессах было впервые замечено в водопадах, вокруг которых воздух оказывался отрицательно заряженным [1, 3, 4, 13]. Было установлено, что мельчайшие капельки воды, которые длительное время держатся в воздухе во взвешенном состоянии, заряжаются отрицательно. Капли же больших размеров заряжены преимущественно положительно и из-за своей большой массы располагаются у поверхности воды или в появляющемся над ней тумане. Причиной возникновения электрических зарядов при дроблении жидкостей является двойной электрический слой на их поверхности с внешней отрицательной оболочкой, граничащей с окружающей газовой фазой. В работах [1, 4] приведено следующие

⁴ NFPA 77. Recommended Practice on Static Electricity. Current Edition: 2014.

⁵ API RP 2003. Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning, and Stray Currents. BALLOT DRAFT 4-10-2006.

⁶ Там же.



Рис. 3. Схематическое изображение ориентации диполей и ионов на поверхности воды [1, 4]: 1 – H₂O-диполь; 2 – отрицательный ион; 3 – положительный ион

Fig. 3. Schematic of dipole and ion orientation at water surface [1, 4]: 1 – H₂O-dipole; 2 – negatively charged ion; 3 – positively charged ion

щее объяснение механизму возникновения этого двойного слоя. Он обусловлен появлением на границе жидкости и газа электрических диполей, отрицательные полюсы которых направлены наружу, а положительные обращены внутрь объема жидкости.

Эти ориентированные диполи связывают у своих внутренних положительных полюсов анионы как самой жидкости, так и ее примесей. Между анионами, локализованными у поверхности, и катионами действуют более слабые силы. Поэтому катионы лишь частично экранируют анионы, и значительная часть катионов совершает тепловое движение в объеме жидкости. Соотношение между общим количеством адсорбированных анионов и количеством анионов, экранированных катионами, зависит от природы анионов, их влияния на поверхностное натяжение, а также от концентраций катионов и анионов в растворе. Локализованные некомпенсированные анионы и свободные катионы в объеме жидкости и образуют на поверхности раздела газ-жидкость двойной слой, характеризуемый потенциалом Гельмгольца, равным для дистиллированной воды примерно 0,06 В. На рисунке 3 схематично показано образование двойного слоя. Электризация жидкостей при их распылении имеет место во всех тех случаях, когда происходит разрыв их поверхностных двойных слоев.

В процессе разбрызгивания, распыления или других механических воздействий на поверхность жидкости от нее отрываются тонкие слои воды. Они образуют капельки диаметром около 1 мкм, которые

имеют избыточный отрицательный заряд. Если с поверхности жидкости отрываются слои, расположенные глубже, то вслед за маленькими каплями отрываются и большие капли, несущие избыточный положительный заряд [4].

Факторы, влияющие на величину электрического заряда при распылении жидкостей, имеют разнообразную природу и характеризуются различными величинами. Большую роль играет не только размер капель и их статическое распределение, но и скорость дробления жидкости и время образования новых поверхностей [4].

Этот механизм электризации присущ не только воде с ее высокой диэлектрической проницаемостью, значительным поверхностным натяжением и содержащей молекулы с большим дипольным моментом. Установлено, что некоторые классы органических веществ, обладающих дипольными моментами, при достаточном количестве соответствующих ионов примесей также обнаруживают электризацию при распылении [1].

В системах, использующих падающую воду, при наличии интенсивных воздушных потоков могут возникать сильные искровые разряды. Этому способствует меньшая пробивная прочность воздуха, содержащего водяные капли. В связи с этим наиболее эффективными электростатическими генераторами такого типа является оборудование, где используются струи влажного пара под большим давлением. Необходимо особо отметить, что небольшие концентрации растворов солей могут привести к более эффективной электризации воды при ее распылении [1].

Опасность возникновения электростатических зарядов при распылении горючих жидкостей в инженерной практике возникает в процессе их налива свободно падающей струей и слива, при мойке резервуаров нефтепродуктов и грузовых танков нефтяных танкеров водой и водяным паром. В этих случаях в резервуарах может возникнуть облако мелких капель, несущее, подобно грозовому облаку, значительный униполярный электрический заряд. При его значительной величине возможен электрический разряд, который

может воспламенить пары жидкости [3, 7, 9, 14, 15]. В связи с этим в отечественных и зарубежных нормативно-правовых актах, регламентирующих безопасность обращения с нефтепродуктами, запрещается заполнять резервуары горючими жидкостями свободно падающей струей.

В «Международном руководстве по безопасности для нефтяных танкеров и терминалов»⁷ (далее – «Международное руководство») это облако идентифицируют как «электростатически заряженный туман», который равномерно распределяется во всем объеме танка, который моют. При этом отмечается, что заряды статического электричества могут значительно меняться от танка к танку по величине и знаку.

В начале мойки танка, загрязненного нефтепродуктами, заряд тумана, первоначально имеющий отрицательный знак, достигает максимального своего значения, а затем возвращается к нулю и, наконец, увеличивается, достигая положительного равновесного значения⁸. Было обнаружено, что среди многих переменных, влияющих на уровень и полярность электризации, наиболее существенное влияние оказывают характеристики моечной воды и степень загрязненности танка. Характеристики электростатической зарядки воды изменяются в процессе рециркуляции или добавления в танк очищающих химикатов, причем в обоих случаях в тумане возможно образование чрезвычайно высоких электростатических потенциалов. Они более значительны в больших танках по сравнению с потенциалами в танках меньших размеров. Размер и количество моечных машинок в танке влияют на интенсивность изменения заряда, но они почти не оказывают никакого влияния на его окончательно установившуюся величину.

Заряженные капли тумана, образовавшиеся в танке во время мойки, способствуют образованию электростатического поля, которое характеризуется распределением потенциала (напряжения) во всем пространстве танка. Переборки и конструктивные элементы танка имеют потенциал земли (нулевой потенциал); потенци-

ал пространства увеличивается по мере удаления от этих поверхностей и приобретает наибольшее значение в точках, максимально удаленных от них. Напряженность поля и разность потенциалов в пространстве танка являются наибольшими рядом с переборками и конструктивными элементами, особенно там, где имеются выступы.

На основании результатов последующих интенсивных экспериментальных исследований и многолетнего практического опыта постройки танкеров были разработаны рекомендации по мойке танка, изложенные в разделе 11.3 «Международного руководства». Там приведены меры по предотвращению образования в туманах избыточного заряда, а также порядок контроля процесса ввода в танк, содержащий заряженный туман, незаземленных проводящих ток предметов. Подобные руководства разработаны и для мойки резервуаров.

Таким образом, электризация при распылении жидкостей обусловлена разрывом поверхностной пленки жидкостей и растворов механическими силами, в том числе при разбиении их высокоскоростных струй о твердую поверхность. Эта группа процессов является следствием существования внутренних двойных электрических слоев на поверхности раздела жидкостей. В основе этой группы явлений лежит ионный механизм.

Электризация балласта в трюмах нефтерудовозов в результате сильных ударов о стенки трюма во время качки судна

В «Международном руководстве» отмечается, что в частично заполненных трюмах нефтерудовозов иногда образуются заряженные туманы, подобные тем, которые имеют место во время мойки танков нефтяных танкеров. Эти туманы с учетом конструктивных особенностей нефтерудовозов могут возникать из-за сильных ударов балласта о стенки трюма во время качки судна даже при умеренном волнении моря. Удары способствуют образованию в танке свободно летящих водных массивов, и если атмосфера в трюме является воспламеняющейся, то в нем присутствуют все факторы, приводящие к воспламенению. Для предотвращения такой ситуации следует либо оставлять трюмы порожними, либо полностью их заполнять, чтобы

⁷ Международное руководство по безопасности для нефтяных танкеров и терминалов. Дополнение к общим и специальным правилам перевозки наливных грузов. Введено письмом Министерства транспорта РФ № МФ-35/751 от 18.04.1997.

⁸ Там же.

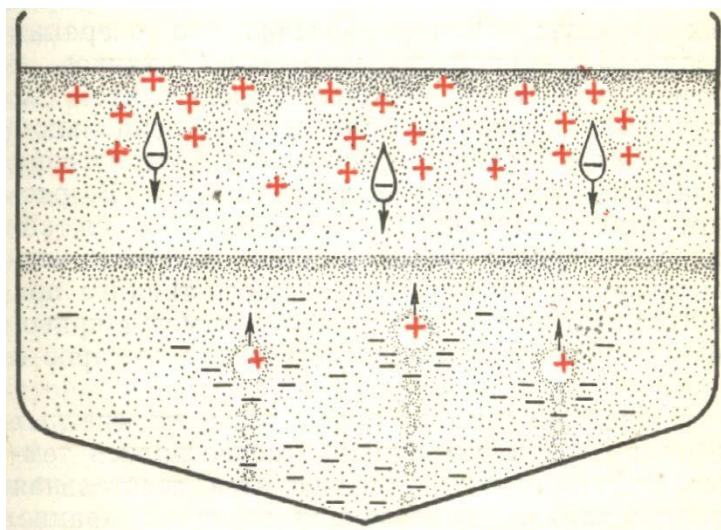


Рис. 4. Электризация нефтепродукта при оседании в нем капелек воды и частиц примесей⁹

Fig. 4. Electrostatic charging of petroleum product with the settling of water droplets and impurity particles

исключить сильное волнение жидкости при движении судна.

Электризация нефтепродуктов за счет оседания в них капель воды, твердых примесей, воздушных и/или газовых пузырьков

Следует отметить, что в крупных резервуарах в момент загрузки в них нефтепродуктов, содержащих воду, может происходить электризация за счет оседания воды [3]. Вода как вещество более тяжелое, чем любой из светлых нефтепродуктов, оседает в топливе, унося электрические заряды одного знака к днищу и оставляя заряд другого знака в жидкости (рис. 4) [14]. Опасность попадания и оседания воды в танках нефтяных танкеров усугубляется еще и тем, что электризация происходит постепенно и может незаметно достигнуть значительного уровня во время рейса, спустя много часов после окончания заливки жидкого груза [14].

Твердые частицы примесей (например, ржавчины), попавшие в топливо и оседающие в нем при наливке, также способствуют его электризации [9]. Взбалтывание нефтепродуктов, особенно имеющих примеси, в процессе качки танкера, а также при движении автоцистерн благоприятствует образованию электростатических зарядов. Согласно «Международному руководству», этому активно способствуют пузырьки находящегося в них воздуха. Воздушные и/

или газовые пузыри в жидкости способны генерировать заряды СЭ. В связи с этим насосы и эжекторы должны эксплуатироваться без подсоса воздуха или газа. По этой же причине весьма опасно перемешивание нефтепродуктов с воздухом [3, 11].

Необходимо отметить, что возникновение зарядов СЭ происходит при оседании несмешивающихся жидкостей («Международное руководство»).

Электризация при истечении газов и паров

Перемещение и истечение чистых газов и их смесей практически не приводит к появлению электростатических зарядов. Однако наличие в потоке газа твердых частиц или капель жидкости может приводить к их электризации и зарядке оборудования, по которому они перемещаются¹⁰ [8, 9]. При истечении струей насыщенного пара был получен разряд СЭ, длина канала которого составляла 0,6 м [16]. Типичными процессами, которые могут привести к значительным электростатическим зарядам и, как следствие, к разрядам СЭ, являются пневматический транспорт, выпуск сжатого газа с наличием твердых частиц (например, ржавчины) или капель, пара или жидкого диоксида углерода, аспирация пыли или распыление краски.

В связи с использованием жидкого углекислого газа в огнетушителях целесообразно упомянуть о его электризации при истечении из сопла. Установлено, что в процессе выпуска сжатого жидкого диоксида углерода из сопла (насадки) происходит его быстрое охлаждение, которое может привести к образованию частиц твердого диоксида углерода, заряжающихся при столкновении и контакте с соплом. Заряд может быть значительным, что может стать причиной образования воспламеняющих разрядов СЭ [17]. В связи с этим жидкий диоксид углерода не используют для инертзации пожаровзрывоопасных газовых сред. В п. 3.3.6 «Международного руководства» отмечено, что диоксид углерода не следует подавать в грузовые танки

⁹ API RP 2003. Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning, and Stray Currents. BALLOT DRAFT 4-10-2006.

¹⁰ BGR 132. Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit. Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen. 2004.

танкеров или насосные отделения, в которых могут содержаться воспламеняющиеся газовые смеси.

В этом же документе сказано, что в том случае, когда источником инертного газа на танкерах и комбинированных судах является дымовой газ из главного или вспомогательных судовых котлов, приносимые им в танки мелкие частицы могут быть электростатически заряженными. Разделение заряда происходит в процессе сгорания топлива, а заряженные частицы могут проникнуть в грузовые танки через скруббер, вентилятор и распределительные трубы. Электростатический заряд, переносимый инертным газом, обычно мал, но было отмечено, что уровни такого заряда намного выше по сравнению с зарядами, встречающимися в водных туманах, образующимися в процессе мойки. Так как танки обычно заполнены инертным газом, то вероятность электростатического воспламенения следует рассматривать только в случае, когда необходимо инертизировать танк, в котором уже присутствует воспламеняющаяся атмосфера, или если в уже инертизированном танке возможно воспламенение вследствие увеличения содержания кислорода в результате поступления воздуха.

Пропарка резервуаров и отсеков нефтяных танкеров водяным паром приводит к образованию зарядов СЭ в образовавшемся при этом тумане, причем более значительных, чем те, которые возникают в процессе их мойки водой. Времени, необходимого для образования максимального по величине заряда, требуется при этом гораздо меньше.

Следует учитывать, что при пропарке емкостей, загрязненных нефтепродуктами, может возникнуть взрывоопасная смесь. В связи с этим «Международное руководство» запрещает впускать пар в грузовые танки, в которых атмосфера может стать взрывоопасной.

Электризация твердых тел

К числу основных механизмов и явлений, приводящих к возникновению электростати-

ческих зарядов на твердых телах, относятся следующие [1].

– *Контактная электризация, или электризация Вольта*, возникающая при контакте двух металлов или металла с полупроводником. Это явление обусловлено переходом электронов через границу раздела, что в свою очередь вызвано различием в положении электронных энергетических уровней.

– *Электризация трения, или трибоэлектризация*, которая, являясь частным случаем контактной электризации, происходит в результате контакта или столкновения сухих поверхностей двух твердых тел и их последующего разделения.

В основе контактного механизма электризации лежит принцип микроразделения зарядов, образовавших двойной электрический слой на межфазных границах (поверхностях) двух, как правило, разнородных твердых тел, например двух твердых изоляторов или изолятора и металла, или двух твердых тел, содержащих различную концентрацию одних и тех же ионов. На рисунке 5 изображена упрощенная схема электризации сыпучего твердого материала при его движении по твердой поверхности и ссыпании в емкость.

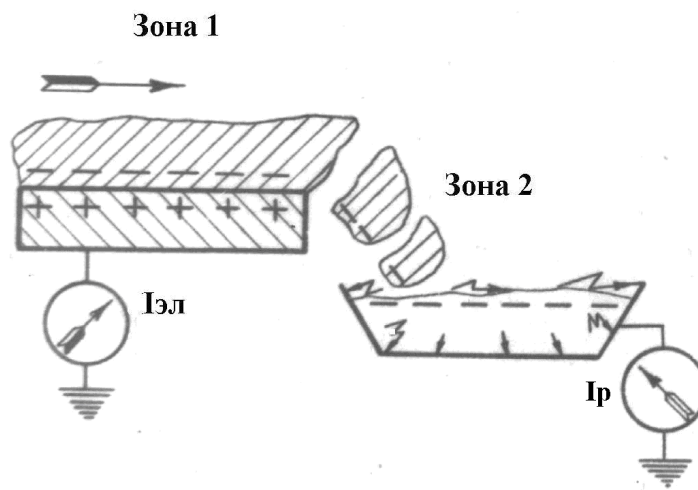


Рис. 5. Упрощенная схема электризации сыпучего твердого материала [18–19]: зона 1 – зона разделения двойного электрического слоя и, как следствие, электризации материала; зона 2 – зона релаксации электростатического заряда материала, приобретенного им в процессе движения по другому твердому материалу, например по стенке стального трубопровода; $I_{эл}$ – ток электризации; I_p – ток релаксации

Fig. 5. A simplified schematic of electrostatic charging in bulk material [18–19]: zone 1 – separation of electrical double layer resulting in electrostatic charging of the material, zone 2 – relaxation of the electrostatic charge acquired by the material during its movement along a different solid material, e.g. the wall of a steel pipe; $I_{эл}$ – electrification current; I_p – relaxation current

Предполагается, что этот механизм обусловлен переходом электронов или ионов между двумя контактирующими поверхностями под действием поверхностных сил.

Следует отметить, что и при реализации вышеуказанных механизмов электризации необходимо учитывать возможность участия в образовании зарядов и электролитических процессов, поскольку при нормальных атмосферных условиях на поверхности большинства твердых материалов находится загрязненный ионами тонкий слой воды [4].

Как показывают различные работы по исследованию процессов электризации, менее всего изучен вопрос действительной природы механизма возникновения и разделения зарядов на твердых диэлектриках. Причины трудностей следует искать как в сложности самой природы явления, так и в сложности экспериментального и теоретического изучения разделения полярных зарядов [4].

Детальное рассмотрение природы и условий возникновения двойных электрических слоев в твердых телах приведено в следующих работах отечественных и зарубежных авторов [1, 4, 20–23].

Приведем примеры электризации твердых тел, возникающей при перетаривании нефтепродуктов:

– Электризация оператора, работающего в одежде и обуви из синтетических материалов. Человек, надежно изолированный от земли обувью или поверхностью, на которой он стоит, может оказаться заряженным статическим электричеством. Возникновение заряда на его теле, одежде и обуви может произойти в результате физического разъединения изолирующих материалов, например, при ходьбе по очень сухой изолирующей поверхности (в результате отшелушивания подошв обуви от этой поверхности) или при раздевании¹¹ [17]. Оператор также может наэлектризоваться при контакте со шлангом из резины или синтетического материала, по которому движется электризующийся нефтепродукт.

– Электризация канатов из синтетических материалов (например, из полипропилена), которыми швартуются танкеры к причалам, при их скольжении в руках рабочих, одетых в перчатки из ПВХ («Методическое

руководство»). Электризация таких канатов возникает дополнительно при их трении о поверхность корпуса судна, при сматывании и наматывании на вьюшки, перемещении относительно поверхностей кнехтов, клюзов, барабанов лебедок, шпилей и т. п., а также при натяжении, приводящему к взаимному перемещению и трению их волокон [14].

– Электризация шин автоцистерн в результате их трения с покрытием дороги, особенно асфальтом [11]. Заряды СЭ образуются по площади касания асфальта с колесами и накапливаются главным образом на шинах, на которых может быть достигнуто напряжение до 15000 В по отношению к земле. Затем эти заряды могут переходить на корпус резервуара автоцистерны. Такая сильная электризация шин наблюдается только при особенно сухом воздухе и совершенно сухом асфальте.

При транспортировке нефтепродуктов, их наливке и сливе необходимо принимать во внимание и электризацию проводящих изделий и материалов по индукции. Как известно, в проводнике, внесенном в электрическое поле, происходит перераспределение свободных зарядов, в результате чего на его поверхности возникают положительные и отрицательные заряды. Этот процесс называют электростатической индукцией (зарядением через влияние), а появившиеся на поверхности проводника заряды – индукционными (наведенными) зарядами [25]. Это явление имеет место, например, при использовании погружного замерного или пробоотборного оборудования в резервуарах сразу же после заливки в них нефтепродуктов. На явлении индукции основан эффект ионизации на заземленных металлических остриях в сильном электрическом поле, который используется в индукционных ионизаторах для снятия зарядов статического электричества с различных объектов [4, 6].

Таким образом, мы рассмотрели основные механизмы возникновения электростатических зарядов в жидкостях и на твердых телах и отдельно разобрали случаи возникновения зарядов СЭ во время производственных операций с нефтепродуктами, что поможет работе экспертов в ходе производства судебных пожаро-взрывотехнических экспертиз.

¹¹ Методическое руководство; BGR 132. Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit. Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen. 2004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лёб Л. Статическая электризация / Перевод с англ. В.М. Фридкина. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 408 с.
2. Клинкаберг А. Образование статического электричества при движении жидкости внутри электрически заземленного оборудования // IV Международный нефтяной конгресс (Рим, июнь 1955). Т. VIII. Оборудование, металлы и защита от коррозии. М.: Гостоптехиздат, 1956. С. 201–212.
3. Захарченко В.В., Крячко Н.И., Мажара Е.Ф., Севриков В.В., Гавриленко Н.Д. Электризация жидкостей и ее предотвращение. М.: Химия, 1975. 128 с.
4. Статическое электричество при переработке химических волокон / Под ред. И.П. Генца, перевод с нем. А.В. Морозова и др. М.: Легкая индустрия, 1966. 345 с.
5. Физический словарь / Под ред. П.Н. Беликова. Т. 2: Давление воздуха – Коллекторы. М.: ОНТИ НКТП СССР, 1937. 864 с.
6. Максимов Б.К., Обух А.А., Тихонов А.В. Электростатическая безопасность при заполнении резервуаров нефтепродуктами. М.: Энергоатомиздат, 1989. 152 с.
7. Максимов Б.К., Обух А.А. Статическое электричество в промышленности и защита от него. М.: Энергия, 1978. 80 с.
8. Роджерс Д.Т., Шлексер Ц.Е. Теоретические и экспериментальные исследования электризации топлив // V Международный нефтяной конгресс (Нью-Йорк, май 1959). Т. IV. Транспорт, качество и применение нефтяных продуктов. М.: Гостоптехиздат, 1961. С. 331–347.
9. Pratt Th. H. *Electrostatic Ignitions of Fires and Explosions*. New York: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2000. 196 p.
10. Britton L.G. *Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations*. New York: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1999. 254 p.
11. Д'Есте Ф. Защита оборудования нефтеперерабатывающих заводов от электрических разрядов // IV Международный нефтяной конгресс (Рим, июнь 1955). Т. VIII. Оборудование, металлы и защита от коррозии. М.: Гостоптехиздат, 1956. С. 213–227.
12. Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А. и др. / Под ред. В.М. Кудрявцева. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей: учебник для вузов. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высшая школа. 1983. 703 с.
13. Арабаджи В.И. Загадки простой воды. М.: Знание, 1973. 96 с.
14. Иоссель Ю.Я., Щигловский К.Б. На борту янтарное электричество. Л.: Судостроение, 1966. 140 с.
15. Mills J.S., Oldham R.C. Evaluation and prevention of electrostatic hazards associated with oil tanker operations. Part 1: Tank washing and the pumping of refined products // *Fire Prev.* 1983. No 163. P. 30–34.

REFERENCES

1. Loeb L. *Static electrification*. Translated from English by V.M. Fridkin. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 408 p. (In Russ.).
2. Klinkenberg A. Production of static electricity by movement of fluid within electrically grounded equipment. *IV World Petroleum Congress. (Rome, June, 1955). Vol. VIII. Equipment, metals and protection against corrosion*. Moscow: Gostoptekhizdat. 1956. P. 201–212. (In Russ.).
3. Zakharchenko V.V., Kryachko N.I., Mazhara E.F., Sevrikov V.V., Gavrilenko N.D. *Electrization of liquids and its prevention*. Moscow: Khimiya, 1975. 128 p. (In Russ.).
4. Genz I.P. (ed). *Static electricity in chemical fiber processing*. Moscow: Legkaya industriya. 1966. 345 p. (In Russ.).
5. Belikov P.N. (ed). *Physics dictionary. Vol. 2: Air pressure – Collectors*. Moscow: ONTI NKTP SSSR, 1937. 864 p. (In Russ.).
6. Maksimov B.K., Obukh A.A., Tikhonov A.V. *Electrostatic safety when filling tanks with oil products*. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 152 p. (In Russ.).
7. Maksimov B.K., Obukh A.A. *Static electricity and its prevention in industrial settings*. Moscow: Energiya, 1978. 80 p. (In Russ.).
8. Rogers D.T., Schleckser C.E., Jr. Engineering and theoretical studies of static electricity in fuels. *Fifth World Petroleum Congress. (New York, May 1959). Volume IV. Transport, quality and use of oil products*. Moscow: Gostoptekhizdat, 1961. P. 331–347. (In Russ.).
9. Pratt Th. H. *Electrostatic Ignitions of Fires and Explosions*. New York: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2000. 196 p.
10. Britton L.G. *Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations*. New York: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1999. 254 p.
11. D'Este F. Protection of equipment in an oil refinery against electric discharges. *4th World Petroleum Congress (Rome, June 1955). Vol. VIII. Equipment, metals and protection against corrosion*. Moscow: Gostoptekhizdat. 1956. P. 213–227. (In Russ.).
12. Vasil'ev A.P., Kudryavtsev V.M., Kuznetsov V.A. et al. *Foundations of the theory and calculation of liquid-fuel rocket engines*. 3rd ed. Moscow: Vysshaya shkola. 1983. 703 p. (In Russ.).
13. Arabadzhi V.I. *The secrets of simple water*. Moscow: Znanie, 1973. 96 p. (In Russ.).
14. Iossel' Yu.Ya., Shchiglovskii K.B. *«Amber» electricity onboard*. Leningrad: Sudostroenie, 1966. 140 p. (In Russ.).
15. Mills J.S., Oldham R.C. Evaluation and prevention of electrostatic hazards associated with oil tanker operations. Part 1: Tank washing and the pumping of refined products. *Fire Prev.* 1983. No 163. P. 30–34.

16. Napier D.H. Static Electrification in the Process Industries // *J. Chem. E. Symposium Series*. 1971. No 34. P. 170–174.
17. Hedlund F.H. Carbon dioxide not suitable for extinguishment of smouldering silo fires: static electricity may cause silo explosion // *Biomass & Bioenergy*. 2018. Vol. 108. P. 113–119. DOI: 10.1016/j.biombioe. 2017.11.009
18. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. М.: Химия, 1976. 264 с.
19. Таубкин И.С. Исследование влияния электризации сыпучих пластиков в циклонных аппаратах на их пожаровзрывоопасность. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1968. 133 с.
20. Дерягин Б.В., Кротова Н.А. Адгезия. Исследования в области прилипания и клеящего действия. М.: АН СССР, 1949. 256 с.
21. Алейникова И.Н. Изучение процессов прилипания и электризации частиц диэлектриков при контакте с металлами. Автореф. дис. ... канд. физ.-матем. Наук. Москва, 1967. 13 с.
22. Анисимова В.И. Исследование адгезии и электрических явлений при образовании и нарушении адгезионного контакта полимер-полупроводник (германий). Автореф. дис. ... канд. физ.-матем. наук. Москва, 1967. 11 с.
23. Фрумкин А.Н., Андреев В.Н., Богуславский Л.И. и др. Двойной слой и электродная кинетика. М.: Наука, 1981. 376 с.
24. Таубкин И.С. Пожаровзрывобезопасность автомобильных сливно-наливных эстакад и экспертный анализ нормативно-технических документов, ее регламентирующих. М.: РФЦСЭ, 1999. 76 с.
25. Элементарный учебник физики. Т. II. Электричество и магнетизм / Под ред. Г.С. Ландсберга. М.: Наука, 1967. 479 с.
16. Napier D.H. Static Electrification in the Process Industries. *J. Chem. E. Symposium Series*. 1971. No 34. P. 170–174.
17. Hedlund F.H. Carbon dioxide not suitable for extinguishment of smouldering silo fires: static electricity may cause silo explosion. *Biomass & Bioenergy*. 2018. Vol. 108. P. 113–119. DOI: 10.1016/j.biombioe. 2017.11.009
18. Taubkin S.I., Taubkin I.S. *Fire and explosion hazards of dust-like materials and technological processes of their processing*. Moscow: Khimiya, 1976. 264 p. (In Russ.).
19. Taubkin I.S. *Assessment of electrostatic fire and explosion hazards of loose plastics in cyclones: Cand. Sci. (Engineering) Dissertation*. Moscow, 1968. 133 p. (In Russ.).
20. Deryagin B.V., Krotova N.A. *Adhesion. Studies of clinging and bonding action*. Moscow: AN SSSR, 1949. 256 p. (In Russ.).
21. Aleinikova I.N. *Study of dielectric particle clinging and electrization upon contact with metals: Extended Abstract of Cand. Sci. (Physics and Mathematics) Dissertation*. Moscow, 1967. 13 p. (In Russ.).
22. Anisimova V.I. *Study of adhesion and electric phenomena observed during polymer/semiconductor (germanium) adhesive bonding and debonding: Extended Abstract of Cand. Sci. (Physics and Mathematics) Dissertation*, 1967. 11 p. (In Russ.).
23. Frumkin A.N., Andreev V.N., Boguslavskii L.I. et al. *Double layer and electrode kinetics*. Moscow: Nauka, 1981. 376 p. (In Russ.).
24. Taubkin I.S. *Fire and explosion safety of truck loading platforms and scientific analysis of current technical regulations*. Moscow: FFCFS, 1999. 76 p. (In Russ.).
25. Landsberg G.S. (ed). *A physics primer. Vol. II. Electricity and magnetism*. Moscow: Nauka, 1967. 479 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Таубкин Игорь Соломонович – к. т. н., главный научный сотрудник отдела научно-методического обеспечения производства экспертиз ФБУ РФЦСЭ при Минюсте России; e-mail: onmo@sudexpert.ru.

ABOUT THE AUTHOR

Taubkin Igor' Solomonovich – Doctor of Science (Engineering), Principal Research Associate at the Research Methodology Department of the Russian Federal Centre of Forensic Science of the Russian Ministry of Justice; e-mail: onmo@sudexpert.ru.