

С. И. Кицис, В. С. Орлов, З. С. Салихов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗРЫВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ХРАНИЛИЩ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Доказывается возможность усиления напряженности электрического поля, последующего возникновения искрового разряда и, соответственно, взрыва в газовом пространстве хранилища углеводородного сырья при открытии мерного люка на стационарной металлической крыше и опускании в хранилище металлического пробника, соединенного неизолированным электропроводом с корпусом резервуара.

Одна из важных задач при эксплуатации металлических хранилищ жидких углеводородов — обеспечение их безопасной эксплуатации, и в частности предотвращение взрывов, которые возникают в результате электризации парогазовой смеси в газовом пространстве нефтехранилищ.

Иллюстрацией этих слов является тяжелейшая авария с человеческими жертвами, которая произошла в цехе нефтепродуктов одного из газодобывающих предприятий на севере Тюменской области. События развивались следующим образом. Два работника поднялись на стационарную крышу металлического хранилища цилиндрического типа объемом 5000 м³, открыли замерный люк и стали опускать в резервуар пробник, представляющий собой медное ведро со стеклянным сосудом внутри. Пробник опускался на медном неизолированном проводе, конец которого был соединен с надежно заземленным металлическим корпусом резервуара (хранилища). Существенно заметить, что за сутки до описываемых событий температура окружающей среды была равна -9 °С, а в момент аварии составляла -39 °С. Через несколько секунд после начала опускания пробника послышался сильный гул, после чего возник взрыв.

Физическое объяснение картины произошедшей аварии состоит в следующем. В связи с резким перепадом температур окружающей среды сохранившийся внутри хранилища теплый воздух стал вытесняться поступающим из люка более тяжелым холодным. Это вызвало резкую конденсацию и связанную с этим процессом интенсивную дополнительную электризацию парогазовой смеси в газовом пространстве нефтехранилища.

Существует несколько гипотез, объясняющих явление электризации капель паровоздушной смеси. У авторов имеется свое представление о физических основах этого процесса, которое будет раскрыто в другой статье. Здесь нам хотелось бы показать возможность возникновения взрыва при взятии пробы в процессе опускания пробника, связанную со снижением пробивного напряжения, требуемого для возникновения взрыва.

Появление электрической искры, образующейся при возникновении электрического разряда в парогазовой смеси, возможно при напряженности поля, равной примерно 30 кВ/см. Напряженности электростатического поля, наблюдаемые в реальных резервуарах, оказываются на порядок ниже указанной величины.

Рассмотрим возможность резкого усиления электростатического поля в микрообъемах и, соответственно, возникновения электрической искры под днищем медного пробника, опускаемого в резервуар.

Примем в качестве исходного положения, что парогазовая смесь в газовом пространстве резервуара является наэлектризованной и каждая точка пространства резервуара имеет определенный электрический потенциал.

С другой стороны, медный пробник имеет потенциал, равный потенциалу земли, т. е. нулю. Таким образом, в каждый момент времени объем пространства под металлическим пробником находится под действием разности потенциалов, которая непрерывно изменяется, имея тенденцию к нарастанию, поскольку напряженность электрического поля

$$E = \frac{\Delta U}{l}, \quad (1)$$

где $\Delta U = U_1 - U_2$, U_1 — электрической потенциал конкретной точки A на пути движения пробника, $U_2 = 0$ — потенциал земли.

По мере приближения пробника к точке A (рис. 1) напряженность поля возрастает, как следует из формулы (1), причем тенденция этого роста такова, что по мере стремления l к нулю напряженность стремится к бесконечности.

Помимо учета этой тенденции, можно использовать результаты, которые впервые получили исследователи гидрометеоров [1–5]. В частности, авторы исследования [5] создавали электростатическое поле между двумя дисковыми электродами диаметром 98 мм с межэлектродным расстоянием 47 мм и помещали между ними проводящие и непроводящие (диэлектрические) шары радиусами 5,5 и 9,5 мм. При этом исследователи наблюдали уменьшение пробивного напряжения, причем электрический разряд между электродами проходил через вышеупомянутые шары [5].

В нашем случае под пробником находились капли сконденсировавшейся жидкости (газойля), которые под воздействием разностей потенциалов конкретных точек пространства и пробника образовывали диполи наведенных поляризованных зарядов q . Эти заряды создают дополнительную составляющую напряженности $E_{\text{усил}}$ электрического поля, которая обуславливает снижение пробивного напряжения. Рассмотрим схему, поясняющую суть вопроса (рис.).

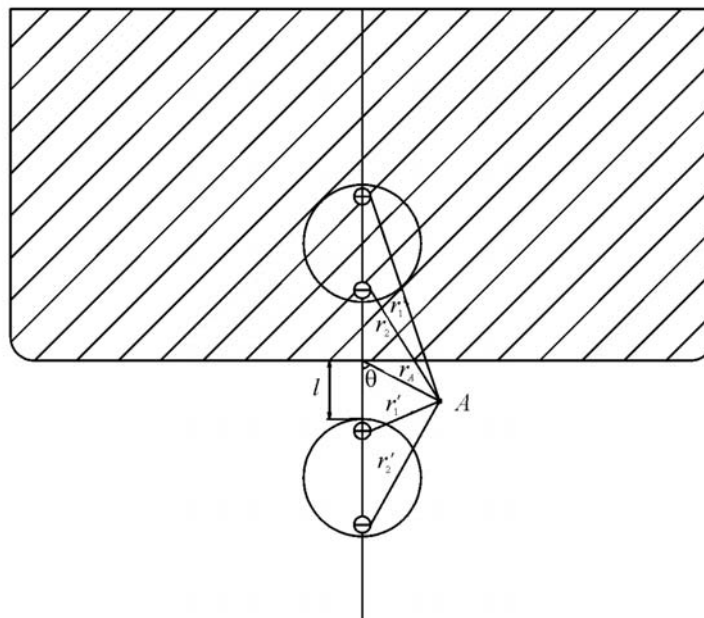


Рис. Схема, поясняющая определение расчетных параметров

Так как днище пробника является металлическим, то для расчета значения дополнительной составляющей напряженности электростатического поля, определяемого любой парой диполей с зарядом q под днищем, можно воспользоваться методикой зеркальных изображений [6].

Введем обозначения:

d — плечо диполя;

$M = d \cdot q$ — электрический момент диполя.

Согласно методу зеркальных изображений диполь отражается зеркально в проводящей полуплоскости, за которую можно принять днище пробника, при условии рассмотрения малых объемов газового пространства под пробником.

Будем обозначать электрический потенциал буквой U , как принято в электротехнике [6].

Потенциал поля, дополнительно созданного опускающимся металлическим пробником, можно вычислить согласно известной формуле [6].

$$U = q \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_1'} - \frac{1}{r_2'} \right), \quad (2)$$

где r_1, r_2, r_1', r_2' — расстояние от капель, образующих диполь, до конкретной точки пространства A , в которой вычисляется напряженность наведенного поля.

Применив полярную систему координат, согласно теореме косинусов найдем:

$$r_1^2 = (d+l)^2 + r_A^2 - 2 \cdot (d+l) \cdot r_A \cdot \cos(\pi - \Theta), \quad (3)$$

$$r_2^2 = l^2 + r_A^2 - 2 \cdot l \cdot r_A \cdot \cos(\pi - \Theta), \quad (4)$$

$$r_1'^2 = l^2 + r_A^2 - 2 \cdot l \cdot r_A \cdot \cos \Theta, \quad (5)$$

$$r_2'^2 = (d+l)^2 + r_A^2 - 2 \cdot (d+l) \cdot r_A \cdot \cos \Theta. \quad (6)$$

Обратные расстояния, входящие в (3)–(6), удобно записать в виде:

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{((d+l)^2 + r_A^2)^{1/2}} \cdot \frac{1}{(1 + 2 \cdot \rho \cdot \cos \Theta)^{1/2}}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{r_2} = \frac{1}{(l^2 + r_A^2)^{1/2}} \cdot \frac{1}{(1 - 2 \cdot \chi \cdot \cos \Theta)^{1/2}}, \quad (8)$$

$$\frac{1}{r_1'} = \frac{1}{(l^2 + r_A^2)^{1/2}} \cdot \frac{1}{(1 - 2 \cdot \chi \cdot \cos \Theta)^{1/2}}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{r_2'} = \frac{1}{((d+l)^2 + r_A^2)^{1/2}} \cdot \frac{1}{(1 - 2 \cdot \rho \cdot \cos \Theta)^{1/2}}, \quad (10)$$

где

$$\chi = \frac{l \cdot r_A}{l^2 + r_A^2}, \quad \rho = \frac{(d+l) \cdot r_A}{(d+l)^2 + r_A^2}. \quad (11)$$

Выражения $(1 \pm 2 \cdot \chi \cdot \cos\Theta)^{-1/2}$ и $(1 \pm 2 \cdot \rho \cdot \cos\Theta)^{-1/2}$ представим в виде степенных рядов для условий:

$$2 \cdot \chi \cdot \cos\Theta < 1, \quad 2 \cdot \rho \cdot \cos\Theta < 1. \quad (12)$$

Первое условие (12) оказывается справедливым для первого выражения (11), когда $r_A < l$, т. е. для локального пространства вблизи к центру днища пробника. Второе условие (12) выполняется всегда, поскольку максимальное значение наведенного поля будет наблюдаться между центром днища и выделенным диполем на вертикальной оси пробника при $r_A < l$.

Поскольку ряды оказываются быстросходящимися, ограничимся первыми четырьмя членами разложений и, используя их выражения в формуле (12), с учетом соотношений (7)–(10) найдем:

$$U = 2 \cdot q \cdot \cos\Theta \cdot \left[\frac{l \cdot r_A}{(l^2 + r_A^2)^{3/2}} \cdot \left(1 + \frac{5 l^2 \cdot r_A^2 \cdot \cos^2 \Theta}{2 (l^2 + r_A^2)^2} \right) - \frac{(d+l) \cdot r_A}{((d+l)^2 + r_A^2)^{3/2}} \cdot \left(1 + \frac{5 (d+l)^2 \cdot r_A^2 \cdot \cos^2 \Theta}{2 ((d+l)^2 + r_A^2)^2} \right) \right]. \quad (13)$$

Взяв производную от полученного выражения для электрического потенциала (13), найдем величину местных усиленных напряженностей поля, которые создаются в местах расположения капель под днищем пробника, где, собственно, и возникают лавинообразные процессы, приводящие к искровому разряду в газовом пространстве хранилища и в конечном счете к взрыву:

$$E_{r_A} = -\frac{dU}{dt}, \quad (14)$$

$$E_{\Theta} = -\frac{1}{E_{r_A}} \cdot \frac{dU}{d\Theta}.$$

Усиленная напряженность поля определяется соотношением

$$E_{\text{усил}}^2 = E_{r_A}^2 + E_{\Theta}^2. \quad (15)$$

На вертикальной оси пробника при $\Theta = 0$, вторая составляющая напряженности $E_{\Theta} = 0$. В связи с этим

$$E_{\text{усил}}^2 = E_{r_A}^2 = -\frac{dU}{dt}.$$

Окончательно напряженность усиленного электрического поля определяется формулой:

$$E_{\text{усил}} = \frac{P}{d/2} \cdot \left[\frac{l \cdot (l^2 - 2 \cdot r_A^2)}{(l^2 + r_A^2)^{5/2}} + \frac{5}{2} \cdot \frac{l^3 \cdot r_A^2 \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot r_A^2)}{(l^2 + r_A^2)^{9/2}} - \frac{(d+l) \cdot ((d+l)^2 - 2 \cdot r_A^2)}{((d+l)^2 + r_A^2)^{5/2}} - \frac{5}{2} \cdot \frac{(d+l)^3 \cdot r_A^2 \cdot (3 \cdot (d+l)^2 - 4 \cdot r_A^2)}{((d+l)^2 + r_A^2)^{9/2}} \right], \quad (16)$$

где $P = (d/2)^3 \cdot E$; E — напряженность поля в точке A , имевшая место до открытия смотрового люка.

С учетом условий разложения второй и четвертый члены в соотношении (16) существенно меньше первого и третьего. Расположим точку A на оси пробника так, чтобы $r_A = l$. Тогда сможем получить удобную формулу для оценки величины усиливающейся под влиянием опускающегося металлического пробника напряженности поля.

$$\frac{E_{\text{усил}}}{E} = 0,177 \cdot \frac{(d/2)^2}{l^2} \cdot \left[1 + \frac{5,6 \cdot l^2 \cdot (d+l) \cdot ((d+l)^2 - 2l^2)}{((d+l)^2 + l^2)^{5/2}} \right]. \quad (17)$$

Из соотношения (17) нетрудно видеть, что если отношение $\frac{l}{d/2}$ уменьшить, то отношение $\frac{E_{\text{усил}}}{E}$ увеличится. Иными словами, приближение пробника к диполю приводит к резкому увеличению $E_{\text{усил}}$. Это обстоятельство и обуславливает возможность возникновения взрыва.

Как показывают расчеты, в точках, близких к центру днища пробника, напряженность $E_{\text{усил}} \gg E$, а в точках, далеких от пробника, т. е. при больших значениях l , напряженность $E_{\text{усил}} \ll E$, т. е. влияние наведенного поля практически незаметно.

Вывод

Увеличение напряжения поля под действием пробника приводит к резкому нарастанию ионизации газового пространства нефтехранилища и, соответственно, увеличению вероятности возникновения искрового разряда, приводящего к взрыву.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abbas M. A., Latham J. The disintegration and electrification of charged water drops falling in an electric field // Quart. J. R. Meteorol. Soc. — 1969. — Vol. 95. — P. 63–76.
2. Davis M. K. Two charged spherical conductors in a uniform electric field; forces and field strength // Quart. J. Mech. Appl. Math. — 1964. — Vol. 27. — P. 499–511.
3. Winn W., Moore C. B. Electric field measurements in thunder clouds using instrumented rockets // J. Geophys. Res. — 1971. — Vol. 76, № 21. — P. 5003–5018.
4. Бейтуганов М. Н., Медалиев Х. Х. Электрические разряды в воздухе в присутствии водяных капель // Тр. ВГИ. — 1973. — Вып. 23. — С. 87–90.
5. Бейтуганов М. Н., Медалиев Х. Х. Электрический пробой воздушного промежутка при наличии в межэлектродном пространстве гидрометеоров // Атмосферное электричество. Тр. I Всесоюз. симп. по атмосферному электричеству. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976.
6. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Т. 2, ч. 4. — М.; Л.: Энергия, 1979.

S. I. Kitsis, V. S. Orlov, Z. S. Salikhov

MATHEMATICAL MODEL OF EXPLOSION METAL LIQUID HYDROCARBON STORAGE

The possibility of intensification electrical field strength is proved with further striking of spark and, correspondingly, explosion in gaseous space of hydrocarbon's raw materials storage while opening a delivery hatch on the stationary metal roof and lowering-in metal probe connected by uninsulated electrical wire with the reservoir body.