УДК 614.835.3 DOI: 10.25257/TTS.2018.2.78.43-54

А. Г. Азовцев¹, В. В. Новиков², Е. В. Баринова¹, А. Х. Салихова¹, С. А. Сырбу¹ (ЧВановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, ²Ивановский государственный университет; e-mail: asovtsev121@mail.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАГРЕВЕ ПИРОФОРНОГО СЛОЯ В РЕЗЕРВУАРЕ ВЕРТИКАЛЬНОМ СТАЛЬНОМ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Описан процесс математического моделирования нагрева пирофорного слоя — одной из причин взрывов и пожаров в нефтегазовой отрасли. Приведены некоторые условия, влияющие на процесс нагрева слоя пирофорных отложений. Приведена система уравнений, моделирующая процесс нагрева пирофорного слоя. Представлены расчётные данные математической и сравнены с экспериментальными.

Ключевые слова: нефтегазовая отрасль, пирофорные отложения, самовозгорание.

Введение

Образование пирофорных отложений на внутренней поверхности вертикальных стальных резервуаров (РВС) для хранения нефти и нефтепродуктов представляют большую опасность, которая заключается в их способности окисляться кислородом воздуха с выделением большого количества теплоты. Образование пирофорных отложений происходит в основном при хранении нефти и нефтепродуктов с высоким содержанием серы и сернистых соединений [1-4, 12]. Самовозгорание пирофорных отложений может происходить как в процессе откачки жидкости из РВС, так и после [4]. Так, например, 28 апреля 2016 г. на Гремихинском месторождении в Удмуртии произошёл взрыв паровоздушной смеси внутри РВС со срывом крыши из-за самовозгорания пирофорных отложений, не смотря на предпринятые меры дегазации. Известен случай самовозгорания пирофорных соединений (28 марта 2011 г. в ОАО "Ново-Уфимский НПЗ"), произошедший вследствие попадания воздуха через сквозные отверстия РВС, образовавшиеся в результате коррозионного износа, также с последующим отрывом крыши и горением [5].

Из приведённых примеров видно, что даже применение мер по обеспечению безопасности проведения очистных работ не приводит к абсолютной безопасности. Если для предотвращения образования сквозных отверстий необходимо уделять внимание методам контроля толщины стенок РВС, то для опорожнения РВС нужно обращать внимание на условия и параметры, которые изменяются в процессе опорожнения.

Исследования пожароопасных свойств пирофорных отложений представлены в экспериментальных работах ряда авторов — Реформаторской И.И., Заседателевой Н.А., Бегишева И.Р., Петрова А.П., Подобаева А.Н., Боярова А.Н. и др. [1-3, 6-7, 11].

В работах [2, 6] указываются условия, которые влияют на процесс нагрева пирофорного отложений и их самовозгорания. К таким условиям относятся концентрация кислорода в газовой фазе и толщина пирофорного слоя. Указыва-

ется, что при концентрации кислорода менее 7 % *об*. активность окисления пирофорных отложений снижается и выделяемой в процессе реакции теплоты не хватает для нагрева пирофорных отложений до критической температуры. При толщине пирофорных отложений 3 *мм* и менее они спекаются, но самовоспламенение не происходит. При толщине от 3 до 5 *мм* влияние теплоотвода на границе "пирофорные отложения — стенка РВС", "пирофорные отложения — газовая фаза" снижается. При толщине более 5 *мм* теплоотвод в стенку РВС и в газовую фазу не оказывает существенного воздействия.

Отметим, что экспериментальные исследования нагрева пирофорного слоя, выполненные в лабораторных условиях, требуют значительных материальных и временных ресурсов, не всегда позволяют точно воспроизвести реальные условия в РВС. Построение теоретического описания процесса нагрева и создание компьютерной программы, позволяющей более гибко моделировать и исследовать процессы нагрева и самовозгорания слоя пирофорных отложений, является актуальным.

Целью работы авторов являлось математическое моделирование тепловых процессов при нагреве слоя пирофорных соединений, образовавшихся на внутренней поверхности РВС при их окислении.

Теоретическое описание

На первом этапе авторами были рассмотрены физико-химические процессы, происходящие в РВС для хранения нефти и нефтепродуктов при его опорожнении (рис. 1).

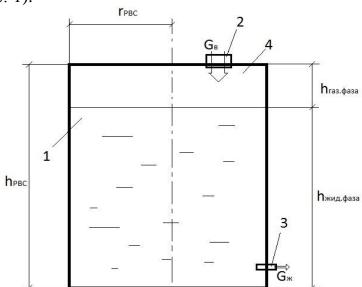


Рис. 1. Схема устройства резервуара вертикального стального для хранения нефти и нефтепродуктов:

1 — нефть или нефтепродукт (жидкая фаза); 2 — дыхательная арматура; 3 — приёмо-раздаточный патрубок; 4 — газовая фаза; h_{PBC} — высота резервуара; r_{PBC} — радиус резервуара; $h_{\text{газ.фаза}}$ — высота газовой фазы; $h_{\text{жид.фаза}}$ — высота жидкой фазы; G_B — расход воздуха через дыхательную арматуру; $G_{\mathcal{K}}$ — расход жидкости через приёмо-раздаточный патрубок

В РВС объёмом V_{PBC} (M^3) закачивается нефть (нефтепродукт), в жидкой фазе которого растворен H_2S . В результате хранения нефти (нефтепродукта) растворённый в жидкой фазе H_2S взаимодействует с внутренней поверхностью РВС, которая соприкасается с жидкой фазой. Помимо этого происходит выделение H_2S и переход его в газовую фазу, где также происходит взаимодействие с внутренней поверхностью РВС, которая соприкасается с газовой фазой. В результате взаимодействия H_2S с внутренней металлической поверхностью РВС, на поверхности последней образуются пирофорные отложения (смесь FeS_2 , Fe_2S_3 , FeO, Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , S и др.).

При опорожнении PBC от нефти (нефтепродукта) через приёмораздаточный патрубок при большом дыхании через дыхательный клапан внутрь PBC попадает воздух. Кислород воздуха взаимодействует с пирофорными отложениями, образовавшимися на внутренней поверхности PBC, которые соприкасаются с газовой фазой. Реакция взаимодействия (окисления) является экзотермической. По мере выделения тепла в результате реакции увеличивается температура слоя пирофорных соединений. При достижении температуры слоя пирофорных соединений порядка 200 °С происходит самовозгорание серы и последующее воспламенение паровоздушной смеси.

Реакция, которая протекает в слое пирофорных отложений, является необратимой, передача тепла осуществляется путём теплопроводности. Принимаем, что реагирующим слоем пирофорных отложений является толщина h_3 , соприкасающаяся с газовой фазой, остальное значение толщины пирофорных отложений h_1 участвует в теплопередаче. Более наглядно направление потока тепла и распределение теплоты показано на рис. 2.

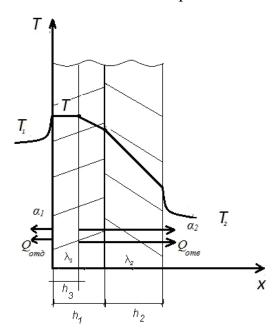


Рис. 2. Схема распределения температур и направления теплового потока в пирофорном слое:

T — температура пирофорного слоя, °C; T_1 — температура на границе реагирующего пирофорного слоя и атмосферы внутри PBC, T_2 — температура окружающей среды снаружи PBC, °C; h_1 и h_2 — толщина пирофорного слоя и стальной стенки PBC соответственно, h_3 — толщина слоя, в котором протекают процессы окисления

Рассмотрим тепловую задачу нагрева стенки резервуара за счёт химической реакции окисления осадка на внутренней поверхности стенки в приближении одномерного распространения теплоты.

Распространение теплоты описывает в материале уравнение теплопроводности (1):

$$c(x)\rho(x)\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \lambda(x)\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + q(x),$$
(1)

где c(x) – теплоёмкость материала;

 $\rho(x)$ – плотность материала;

 $\lambda(x)$ – теплопроводность материала;

q(x) — интенсивность объёмных тепловых источников, действующих внутри материала;

T(x, t) – тепловое поле в материале, как функция координат и времени.

Обозначим толщину стенок резервуара величиной h_2 . Материал стенок имеет постоянные во времени теплоёмкость c_2 , плотность ρ_2 и теплопроводность λ_2 . На внутренней поверхности резервуара существует химический осадок толщиной h_1 с переменными во времени теплоёмкостью c_1 , плотностью ρ_1 и теплопроводностью λ_1 . В определённом слое осадка толщиной h_3 действуют объёмные тепловые источники интенсивностью q_3 , возникающие из-за реакций окисления вещества нефтяного осадка кислородом, содержащимся внутри резервуара.

Тогда функции теплофизических свойств материала можно записать как (2):

$$c(x), \rho(x), \lambda(x) = \begin{cases} c = c_1, \rho = \rho_1, \lambda = \lambda_1 & \text{при } 0 \le x < h_1; \\ c = c_2, \rho = \rho_2, \lambda = \lambda_2 & \text{при } h_1 \le x \le h_1 + h_2. \end{cases}$$
 (2)

Функция внутреннего теплового источника химической реакции будет иметь вид (3):

$$q(x) = \begin{cases} q = q_3, & \text{при } 0 \le x < h_3; \\ q = 0, & \text{при } h_3 \le x \le h_1 + h_2. \end{cases}$$
 (3)

На границах стенки резервуара действуют условия конвективного охлаждения и лучистого теплообмена. На внутренней границе (4):

$$Q_1\big|_{x=0} = -\alpha_1(T(0,t) - T_1) + \varepsilon_1 C_0 \left[\left(\frac{T(0,t) + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1 + 273,15}{100} \right)^4 \right]$$
(4)

и внешней границе (5):

$$Q_{2}\big|_{x=h_{1}+h_{2}} = -\alpha_{2}(T(h_{1}+h_{2},t)-T_{2}) + \varepsilon_{2}C_{0}\left[\left(\frac{T(h_{1}+h_{2},t)+273,15}{100}\right)^{4} - \left(\frac{T_{2}+273,15}{100}\right)^{4}\right], (5)$$

где первое слагаемое в уравнениях (4) и (5) – условие, учитывающий конвективный теплообмен, а второе слагаемое лучистый теплообмен;

 Q_1 и Q_2 — мощность теплового потока с внутренней и внешней поверхностей соответсвенно;

 T_1 и α_1 – температура газа и коэффициент теплоотдачи внутри резервуара;

 T_2 и α_2 — температура воздуха и коэффициент теплоотдачи снаружи резервуара;

 ε_1 и ε_2 – степень черноты на внутренней и внешней границах соответственно;

 C_0 – постоянная Стефана-Больцмана.

На границе раздела отложений и стенки PBC имеет место плотный тепловой контакт, который описывается в моделе равенством температур слоя и стенки при $x=h_1$.

Задача решалась численно методом конечных разностей. Функция температурного поля $T_{i,j}$ задавалась в виде матрицы из N элементов по пространственной координате и M элементов по временной координате. Величина шагов по пространству вычислялась как

$$\Delta x = \frac{h_1 + h_2}{N} \,. \tag{6}$$

Шаг по времени $\Delta \tau$ подбирали с учётом устойчивости численного решения. Принималось, что в начальный момент времени внутри стенки резервуара температура постоянна и равна температуре окружающей среды $T_{i,j} = 0 = T_2$.

Разностное уравнение для расчёта температурного поля внутри стенки резервуара и слоя осадка на внутренней границе имеет вид

$$T_{i,j+1} = T_{i,j} + \frac{\Delta \tau}{c_i \rho_i} \left\{ \lambda_i \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j}}{\Delta x^2} + q_i \right\}, \quad \text{при } i = 2 \dots N - 1.$$
 (7)

С учётом граничных условий расчёт в крайних элементах поля производился по формулам

$$T_{1,j+1} = T_{1,j} + \frac{\Delta \tau}{c_1 \rho_1} \left\{ \lambda_i \frac{T_{2,j} - T_{1,j}}{\Delta x^2} + q_1 - \alpha_1 \frac{T_{1,j} - T_1}{\Delta x} \right\}; \tag{8}$$

$$T_{N,j+1} = T_{N,j} + \frac{\Delta \tau}{c_N \rho_N} \left\{ \lambda_i \frac{T_{N-1,j} - T_{N,j}}{\Delta x^2} + q_N - \alpha_2 \frac{T_{N,j} - T_2}{\Delta x} \right\}.$$
 (9)

На основании построенной теплофизической модели была написана программа для ПК на языке PascalABC.NET. В программу вводятся данные о теплофизических и геометрических параметрах стенок резервуара и осадка, условиях теплообмена на стенках резервуара, числе элементов пространственного и переменного разбиения температурного поля, толщине слоя отложений и стенки PBC. На выходе получается расчёт динамики нагрева пирофорного слоя по времени, а также пространственное распределение температуры вдоль слоя и стенки резервуара после достижения теплонасыщения. Вводимые параметры и результаты расчёта сохраняются в виде листинга в текстовом файле.

Вычислительный эксперимент

С помощью построенной теплофизической модели авторами был проведён численный эксперимент по расчёту изменения температуры в пирофорном слое при начале процесса окисления.

Значения теплофизических параметров для материалов пирофорного слоя и стенки РВС, мощность тепловыделения внутри пирофорного слоя, которые использовались при вычислении, представлены в табл. 1 [8-9]. Принималось, что основным материалов отложений является элементарная сера, содержание которой доходит до 80 % [1]. Мощность тепловыделения внутри пирофорного слоя принимали на основе экспериментальных данных работ [1, 10, 11].

Таблица 1 Значения физических и теплофизических параметров, используемых в математической модели для материалов стенки РВС и отложений

используемых в математической модели для материалов етенки г ве и отложении				
	Единицы измерения	Значение	Значение для материала отложений (сера) при различной температуре	
Параметр		для мате-		
		риала		
		стенки РВС	Температура, °С	Значение
Теплоёмкость, c	Дж/(кг·°С)	460	< 50	705
			> 50	743
			> 100	991
			> 150	1381
			> 200	1151
Плотность, р	кг/м ³	7870	< 50	1920
			> 50	1920
			> 100	1801
			> 150	1797
			> 200	1685
Коэффициент	<i>Вт</i> /(м·°С)	47	_	0,154
теплопроводности, λ				·
Толщина стенки/слоя, h	ММ	11	-	28
Мощность тепловыделения	Вт/кг	0	< 75	700
внутри пирофорного			> 75	70
слоя [1, 10], q			> 116	600
		6,8	< 50	6,8
Коэффициент теплоотдачи		6,8	> 50	6,8
в окружающую среду	$Bm/(M^2 \cdot {}^{\circ}C)$	9,4	> 100	9,4
и внутрь PBC, $\alpha_1 = \alpha_2$		10,6	> 150	10,6
		11,2	> 200	11,2

Температура охлаждающего воздуха снаружи PBC постоянна и принимается равной $20\,^{\circ}C$, температура воздуха внутри PBC изменялась в следствие теплообмена от нагрева пирофорных отложений. Начальная температура в слое и стенке также равна $20\,^{\circ}C$.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования представлены на рис. 3-6. На рис. 3 представлены расчётные данные по изменению температуры в слое от времени нагрева при различной толщине пирофорных отложений. Видно, что при нагреве слоя за счёт окисления вначале процесса температура растёт линейно, но затем рост температуры значительно замедляется при температуре от 60 до 75 °C, это объясняется тем, что происходит испарение воды и снижение электрохимических реакций [11]. При толщине пирофорного слоя в 2 m его максимальная температура в состоянии теплонасыщения согласно расчётам составляет только 76 °C, что ниже опасной температуры самовоспламенения серы. При повышении толщины слоя до 5 m температура слоя в течение 1,5 часов достигает 100 °C, однако воспламенения не происходит.

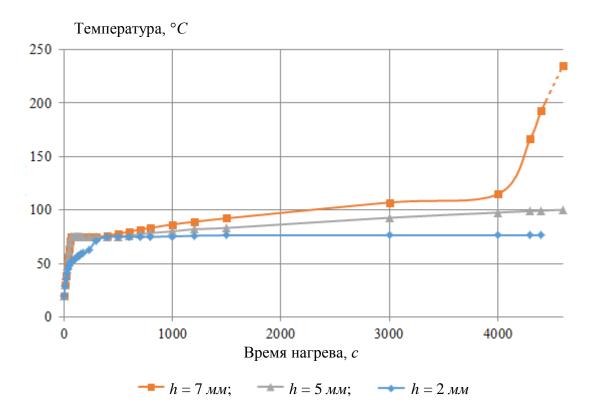


Рис. 3. Влияние времени нагрева на максимальную температуру пирофорного слоя при различной толщине слоя (расчётные данные)

На рис. 4 представлены экспериментальные данные [11] изменения температуры пирофорного слоя по времени. Сравнивая с расчётными данными, представленными на рис. 3 видно, что значения, полученные расчётным способом, близки к экспериментальным.

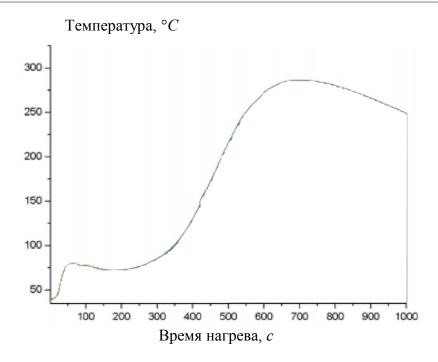


Рис. 4. Изменение температуры пирофорных отложений во времени (экспериментальные данные) [11]

На рис. 5 представлены результаты зависимости максимальной расчётной температуры в пирофорном слое от толщины слоя. Полученные результаты соответствуют данным работ [1-6, 11], согласно которым толщина пирофорного слоя менее 3 *мм* не опасна, толщина пирофорного слоя 5 *мм* может быть опасной в зависимости от активности пирофорных отложений и содержания серы в них.

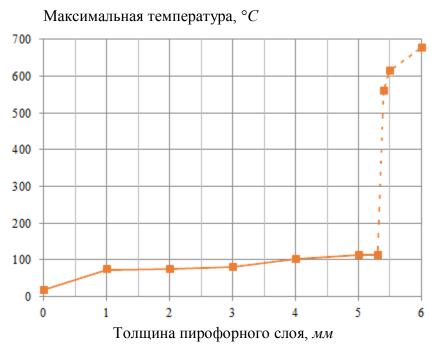


Рис. 5. Влияние толщины пирофорного слоя на максимальную температуру в слое (расчётные данные)

Из рис. 5 видно, что самонагрев пирофорного слоя толщиной 5 мм, согласно расчётным данным, не должен приводить к самовоспламенению элементарной серы и последующему воспламенению паров нефти, так как максимальная температура значительно ниже температуры самовоспламенения серы. При толщине пирофорного слоя свыше 5,3~mm температура слоя достигает опасных значений в $200~^{\circ}C$. Определение максимальной температуры нагрева пирофорных отложений толщиной более 5,3~mm не имеет смысла ввиду того, что температура превышает $200~^{\circ}C$ и должно происходить самовоспламенение элементарной серы, что не моделируется в данной работе, потому на рис. 5 показана аппроксимирующая кривая пунктирной линией.

На рис. 6 представлено распределение температуры по координате для толщины слоя 5 *мм* при теплонасыщении. Видно, что внутри слоя температура снижается от поверхности к границе с металлом. Минимум температуры в слое достигается на границе слоя с металлом, а максимум лежит в точке, которая контактирует с газовой фазой внутри РВС. Это обусловлено тем, что газовая фаза внутри РВС также нагревается и тепловой напор снижается. В толщине металлической стенки РВС температура остаётся практически на одном уровне. Это связано с тем, что металл является хорошим проводником тепла, поэтому внутри него температура перераспределяется более равномерно, чем в пирофорном слое. Полученный результат уточняет схему физических процессов, предложенную на рис. 2.

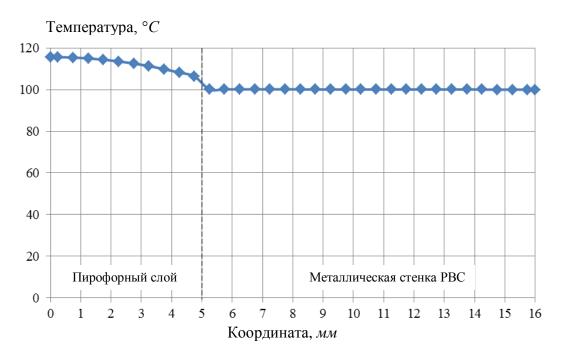


Рис. 6. Распределение температуры по координате для пирофорного слоя толщиной 5 *мм* при теплонасыщении (расчётные данные)

Вывод

Построенная теплофизическая модель процесса нагрева пирофорного слоя соответствует наблюдаемым результатам по влиянию его толщины на самонагрев и самовоспламенение паров в РВС для хранения нефти и нефтепродуктов и может быть использована для практических расчётов.

Дальнейшее развитие модели авторы видят в уточнении описания влияния состава газовой атмосферы внутри PBC и температуры пирофорных отложений на мощность, выделяемую при их окислении.

Литература

- 1. Заседателева Н. А., Реформатская И. И., Подобаев А. Н., Бегишев И. Р. Образование пожароопасных пирофорных отложений при коррозии стали в сероводородной газовой среде // Матер. 14-й науч.-техн. конф. "Системы безопасности 2005". М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. С. 194-196.
- 2. Способ предотвращения образования пирофорных отложений из серосодержащих нефтепродуктов: пат. 2253698 Рос. Федерация. МПК C23F15/00 C01G49/12/ заявитель и патентообладатель: Нисельсон Л. А., Бейлин Ю. А., Бегишев И. Р., Филимонов Л. И., Андросов А. С., Реформатская И. И., Ленский А. Б., Раптанов А. К. № 2005111665/09; заявл. 19.07.04; опубл. 10.06.05.
- 3. Петров А. П., Иванов В. Г., Глухов Г. Ю. Исследование опасности самовозгорания пирофорных отложений в резервуарах с нефтью // Технологии техносферной безопасности. Вып. 3 (25). 2009. 4 с. http://academygps.ru/ttb.
- 4. *Кузин А. В., Теплинский Г. Я., Юшков В. И.* Безопасность ремонтных работ. М.: Химия, 1981. 264 с.
- 5. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. № 5 (56). 2011. http://ib.safety.ru/assets/pdf/Bull 56/Bull 56 19-26.pdf.
- 6. Бояров А. Н. Механизм формирования и защита от самовозгорания пирофорных отложений в вертикальных резервуарах (на примере ОАО "Самаранефтегаз"): дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. Уфа, 2010. 129 с.
- 7. Азовцев А. Г., Салихова А. Х., Сырбу С. А. Образование пирофорных отложений на внутренней поверхности оборудования для хранения нефти и нефтепродуктов как возможность возникновения чрезвычайных ситуаций // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. № 2 (19). 2016.
- 8. *Горшков В. И.* Самовозгорание веществ и материалов. М.: ВНИИПО МЧС России, 2003. 224 с.
- 9. Справочник сернокислотчика / Под ред. проф. *Малина К. М.* М.: изд-во "Химия", 1971. 741 с.
- 10. Бейлин Ю. А., Нисельсон Л. А., Бегишев И. Р., Филимонов Л. И., Шишканов Б. А., Ащеулова И. И., Подобаев А. Н., Реформаторская И. И. Коррозионные пирофорные отложения как промоторы самовозгорания резервуаров с сернистой нефтью // Защита металлов. 2007. Т. 43. № 3. С. 290-295.
- 11. *Dou Z., Jiang J. C., Zhao S. P., Mao G. B., Zhang M. G., Wang L., Wang Z. R.* Experimental investigation on oxidation of sulfurized rust in oil tank // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015. № 38. C. 156-162. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.09.009.
- 12. Kittel J. et al. Corrosion mechanisms in aqueous solutions containing dissolved H_2S . Part 1: Characterisation of H_2S reduction on a 316L rotating disc electrode, Corros. Sci. (2012), http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2012.09.036.

Материал поступил в редакцию 6 июля 2017 г.

Для цитирования: *Азовцев А. Г., Новиков В. В., Баринова Е. В., Салихова А. Х., Сырбу С. А.* Моделирование тепловых процессов при нагреве пирофорного слоя в резервуаре вертикальном стальном для хранения нефти и нефтепродуктов // Технологии техносферной безопасности. — Вып. 2 (78). — 2018 — С. 43-54. DOI: 10.25257/TTS.2018.2.78. 43-54.

A. G. Azovtsev, V. V. Novikov, E. V. Barinova, A. H. Salihova, S. A. Syrbu MODELING OF THERMAL PROCESSES WHEN HEATING OF PYROPHORIC DEPOSITS AT THE VERTICAL STEEL TANKS FOR OIL STORAGE

The heating of layer of pyrophoric deposits as one of the cause of explosions and fires in oil and gas industry is described. It is reported that thickness of pyrophoric deposits, steel substrate and oxygen concentration in the gas phase influence on the process of heating a layer of pyrophoric deposits. A mathematical model of a reservoir is described and an approximate temperature distribution in the layer of pyrophoric deposits is shown. A system of equations, simulating a one-dimensional process for heating a pyrophoric layer, is given, the heat equation is used as the basic equation. The cooling conditions for the tank, both on the inside and outside are added. The calculated data of the mathematical model on the heating of the pyrophoric layer in time, after reaching the maximum calculated self-heating temperature for various thickness of pyrophoric deposits are represented and compared with experimental ones. The temperature distribution in the layer of pyrophoric deposits is shown.

Key words: oil and gas industry, pyrophoric deposits, autoignition.

References

- 1. Zasedateleva N. A., Reformatskaya I. I., Podobaev A. N. Begishev I. R. *Obrazovanie pozharoopasnyh pirofornyh otlozhenij pri korrozii stali v serovodorodnoj gazovoj srede* [Formation of fire-hazardous pyrophoric deposits at corrosion of steel in hydrogen sulfide gas environment]. *Mater. 14-j nauch.-tekhn. konf. "Sistemy bezopasnosti 2005"* [Proceed. of the materials of the 14-th scientific and technical conference "Safety Systems 2005"], Moscow: Academy of State Fire Service of Emercom of Russia Publ, 2005, pp. 194-196.
- 2. Sposob predotvrashcheniya obrazovaniya pirofornyh otlozhenij iz serosoderzhashchih nefteproduktov [The way to prevent the formation of pyrophoric deposits of sulfur-containing petroleum products]. *pat. 2253698 Ros. Federaciya. MPK C23F15/00 C01G49/12/ zayavitel' i patentoobladatel'*: Nisel'son L. A., Bejlin Yu. A., Begishev I. R., Filimonov L. I., Androsov A. S., Reformatskaya I. I., Lenskij A. B., Raptanov A. K. № 2005111665/09.
- 3. Petrov A. P., Ivanov V. G., Gluhov G. Yu. Research of the risk of spontaneous combustion of pyrophoric deposits in reservoirs of oil. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti // Technology of technosphere safety*, vol. 3 (25), 2009, 4 p. (in Russian). Available at: http://academygps.ru/ttb.
- 4. Kuzin A. V., Teplinskij G. Ya., Yushkov V. I. *Bezopasnost remontnyh rabot* [Safety of repairs]. Moscow, Himia Publ., 1981, 264 p.
- 5. Informacionnyj byulleten' Federal'noj sluzhby po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru [Newsletter of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision]. No. 5 (56), 2011. Available at: http://ib.safety.ru/assets/pdf/Bull_56/Bull_56_19-26.pdf.
- 6. Boyarov A. N. *Mekhanizm formirovaniya i zashchita ot samovozgoraniya pirofornyh otlozhenij v vertikal'nyh rezervuarah (na primere OAO "Samaraneftegaz")* [The mechanism of formation and protection against spontaneous combustion of pyrophoric deposits in vertical tanks (for example, JSC " Samaraneftegaz")]: PhD in Tech. Sci. diss., 05.26.03, Ufa, 2010, 129 p.
- 7. Azovcev A.G., Salihova A.H., Syrbu S.A. *Obrazovanie pirofornyh otlozhenij na vnutrennej poverhnosti oborudovaniya dlya hraneniya nefti i nefteproduktov kak vozmozhnost' vozniknoveniya chrezvychajnyh situacij* [A formation of pyrophoric deposits on the internal surface of the equipment for storage of oil and oil products as a possibility of emergency situations]. Bulletin of Voronezh Institute of State Fire Service of Emercom of Russia Publ. no 2 (19), 2016.

- 8. Gorshkov V. I. *Samovozgoranie veshchestv i materialov* [Combustion of substances and materials]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2003, 224 p.
- 9. Spravochnik sernokislotchika [Sulfuric acid handbook]. Ed. by Malin K. M., Khimia Publ., 1971, 741 p.
- 10. Bejlin Yu. A., Nisel'son L. A., Begishev I. R., Filimonov L. I., Shishkanov B. A., Ashcheulova I. I., Podobaev A. N., Reformatorskaya I. I. *Korrozionnye pirofornye otlozheniya kak promotory samovozgoraniya rezervuarov s sernistoj neftyu* [Corrosion pyrophoric deposits as promoters of spontaneous combustion of tanks with sulfurous oil]. *Zashchita metallov / Protection of metals*, 2007, vol. 43, no. 3, pp. 290-295.
- 11. Dou Z., Jiang J. C., Zhao S. P., Mao G. B., Zhang M. G., Wang L., Wang Z. R. Experimental investigation on oxidation of sulfurized rust in oil tank. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, no. 38, pp. 156-162. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.09.009.
- 12. Kittel J. et al. Corrosion mechanisms in aqueous solutions containing dissolved H_2S . Part 1: Characterisation of H_2S reduction on a 316L rotating disc electrode, Corros. Sci. 2012. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2012.09.036.

For citation: Azovtsev A. G., Novikov V. V., Barinova E. V., Salihova A. H., Syrbu S. A. Modeling of thermal processes when heating of pyrophoric deposits at the vertical steel tanks for oil storage. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti // Technology of technosphere safety*, vol. 2 (78), 2018, pp. 43-54 (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2018.2.78.43-54.