



МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ФЛЕГМАТИЗАЦИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Д.Б. ДЕСЯТОВ
А.Н. ЛУКИН
О.Е. РАБОТКИНА
Е.Г. СПИРИДОНОВ
С.Н. ТРОСТЯНСКИЙ
В.И. ФЕДЯНИН

*Воронежский институт
Федеральной службы
исполнения наказаний
России*

*e-mail:
a_dushkin@mail.ru*

Существует подход описания процесса флегматизации резервуара с остатками горючей жидкости дифференциальными уравнениями баланса массы для углеводородов, флегматизатора и кислорода. Эти уравнения будут представлять систему дифференциальных уравнений материального баланса процесса флегматизации резервуара с остатками углеводородных жидкостей. Предположим, что процесс флегматизации, представляет собой процесс, в котором при подаче инертного газа с расходом q происходит интенсивное перемешивание паров нефтепродукта, кислорода и инертного газа, и выброс парогазовоздушной смеси из объема резервуара. Процесс перемешивания паровоздушной смеси и газа преобладает над процессом вытеснения. Подача инертного газа происходит достаточно интенсивно, упругость паров нефтепродукта большая, что обуславливает постоянный поток массы в направлении, перпендикулярном площади испарения.

Ключевые слова: флегматизация, материальный баланс, многокомпонентные углеводороды, резервуар.

Существует подход описания процесса флегматизации резервуара с остатками горючей жидкости дифференциальными уравнениями баланса массы для углеводородов, флегматизатора и кислорода. Эти уравнения будут представлять систему дифференциальных уравнений материального баланса процесса флегматизации резервуара с остатками углеводородных жидкостей:

$$\begin{cases} Vd\varphi_n + q\varphi_n\tau = Wd\tau \\ Vd\varphi_\phi + q\varphi_\phi d\tau = q\varphi_\phi^n d\tau \\ 0,21(1 - \varphi_n - \varphi_\phi) = \varphi_i \end{cases} \quad (1)$$

Предположим, что процесс флегматизации, описанный данной системой (1), представляет собой процесс, в котором при подаче инертного газа с расходом q происходит интенсивное перемешивание паров нефтепродукта, кислорода и инертного газа и выброс парогазовоздушной смеси из объема резервуара. Процесс перемешивания паровоздушной смеси и газа преобладает над процессом вытеснения. Подача инертного газа происходит достаточно интенсивно, упругость паров нефтепродукта большая, что обуславливает постоянный поток массы в направлении, перпендикулярном площади испарения.

Решение уравнения материального баланса для паров углеводорода.

Продифференцируем уравнение (2) материального баланса для углеводородов по $d\tau$ и преобразуем:

$$Vd\varphi_i + q\varphi_i\tau = Wd\tau, \quad (2)$$

где V – объем резервуара; φ_n – концентрация нефтепродукта; τ – время; W – интенсивность испарения.

$$V \frac{d\varphi_n}{d\tau} + q\varphi_n = W, \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi_n}{d\tau} + \frac{q\varphi_n}{V} = \frac{W}{V}, \quad (4)$$

$$\frac{d\varphi_n}{d\tau} = \frac{W}{V} - \frac{q\varphi_n}{V}, \quad (5)$$

$$\frac{d\varphi_n}{d\tau} = \frac{1}{V}(W - q\varphi_n). \quad (6)$$

Решение уравнений материального баланса для флегматизатора и кислорода.

Преобразуем уравнение материального баланса для газообразного флегматизатора:

$$Vd\varphi_{\phi} + q\varphi_{\phi}d\tau = q\varphi_{\phi}^n d\tau, \quad (7)$$

где φ_{ϕ} – текущее значение концентрации флегматизатора; φ_{ϕ}^n – концентрация флегматизатора на притоке.

$$\frac{Vd\varphi_{\phi}}{d\tau} + q\varphi_{\phi} = q\varphi_{\phi}^n \quad (8)$$

$$\frac{d\varphi_{\phi}}{d\tau} + \frac{q\varphi_{\phi}}{V} = \frac{q\varphi_{\phi}^n}{V} \quad (9)$$

$$\frac{d\varphi_{\phi}}{d\tau} = \frac{1}{V}(q\varphi_{\phi}^n - q\varphi_{\phi}) \quad (10)$$

$$\frac{d\varphi_{\phi}}{d\tau} = \frac{q}{V}(\varphi_{\phi}^n - \varphi_{\phi}) \quad (11)$$

Тогда уравнение материального баланса по кислороду примет вид:

$$\varphi_{\phi} = 0,21(\varphi_{\phi}^n - \varphi_{\phi} - \varphi_{\delta}). \quad (12)$$

Решение уравнений материального баланса для многокомпонентных углеводородов.

Для многокомпонентных углеводородов (бензин, дизельное топливо, керосин, нефть) согласно исследованиям, проведенным В.П. Назаровым, интенсивность испарения W величина не постоянная, она изменяется согласно:

$$W = W_0 \cdot e^{-at}.$$

Интенсивность испарения W уменьшается вследствие того, что многокомпонентный нефтепродукт сначала теряет наиболее быстро движущиеся молекулы, вследствие чего средняя кинетическая энергия оставшихся молекул уменьшается и понижается температура жидкости, что тормозит процесс массообмена [2].

Характерной для многокомпонентных нефтепродуктов особенностью процесса испарения является появление новой тормозящей силы, которая обуславливается изменением свойств нефтепродуктов.

Следовательно, для многокомпонентных углеводородов можно составить следующую систему дифференциальных уравнений материального баланса:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_n}{d\tau} = \frac{1}{V} \cdot (W_0 e^{-at} - q\varphi_n) \\ \frac{d\varphi_{\phi}}{d\tau} = \frac{q}{V} \cdot (\varphi_{\phi}^n - \varphi_{\phi}) \\ \varphi_{\kappa} = 0,21 \cdot (\varphi_{\phi}^n - \varphi_n - \varphi_{\phi}) \end{cases} \quad (13)$$

При наличии в резервуаре остатков индивидуальной жидкости, свойства которой не изменяются при ее частичном испарении, выполняется следующее условие: $W = W_0$, т.е. при условии постоянства интенсивности испарения. Следовательно, можно записать преобразованную систему дифференциальных уравнений для однокомпонентных жидкостей [3-4]:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_n}{d\tau} = \frac{1}{V} \cdot (W_0 - q\varphi_n) \\ \frac{d\varphi_{\phi}}{d\tau} = \frac{q}{V} \cdot (\varphi_{\phi}^n - \varphi_{\phi}) \\ \varphi_{\kappa} = 0,21 \cdot (\varphi_{\phi}^n - \varphi_n - \varphi_{\phi}) \end{cases} \quad (14)$$

Вводим обозначения:

$$\frac{W_0}{V} = a; \quad \frac{q}{V} = b; \quad \varphi_n = y; \quad \varphi_{\phi} = x; \quad \tau = t \text{ – время}; \quad \varphi_{\phi}^n = y^*; \quad \varphi_{\kappa} = z;$$

δ_0 – начальное значение φ_i при $t = 0$; y_0 – начальное значение φ_{ϕ} при $t = 0$.

Система уравнений (13) принимает вид:



$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a \cdot e^{-at} - b \cdot x \\ \frac{dy}{dt} = b(y^* - y) \\ z = 0,21(y^* - x - y) \end{cases} \quad (15)$$

Интегрируем уравнение (15).

Решение ищем в виде $x = e^{-at} \cdot \vartheta$. Тогда:

$$\frac{dx}{dt} = -a \cdot e^{-at} \cdot \vartheta + e^{-at} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad (16)$$

Подставляя (16) в (15), получим:

$$-a \cdot e^{-at} \cdot \vartheta + e^{-at} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} = a \cdot e^{-at} - b \cdot e^{-at} \cdot \vartheta \quad (17)$$

После сокращения на e^{-at} найдем:

$$-a \cdot \vartheta + \frac{d\vartheta}{dt} = a - b \cdot \vartheta \quad (18)$$

или

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a - (b - a) \cdot \vartheta \quad (19)$$

После разделения переменных:

$$\frac{d\vartheta}{a - (b - a) \cdot \vartheta} = dt \quad (20)$$

Интегрирование:

$$\int_{\vartheta_0}^{\vartheta} \frac{d\vartheta}{a - (b - a) \cdot \vartheta} = \int_0^t dt, \quad (21)$$

$$\lambda n \frac{a - (b - a) \cdot \vartheta}{a - (b - a) \cdot \vartheta_0} = -(b - a) \cdot t \quad (22)$$

Отсюда после преобразований:

$$\vartheta = \frac{a}{b - a} - \left(\frac{a}{b - a} - \vartheta_0 \right) \cdot e^{-(b-a)t} \quad (23)$$

При $x = e^{-at} \cdot \vartheta$; $t = 0$; $x = x_0$; $\vartheta = \vartheta_0$ $x_0 = e^{-a \cdot 0} \cdot \vartheta_0 = 1 \cdot \vartheta_0$

После подстановки $\vartheta_0 = x_0$ и преобразований окончательно находим:

$$x = \left(x_0 - \frac{a}{b - a} \right) \cdot e^{-b \cdot t} + \frac{a}{b - a} \cdot e^{-a \cdot t} \quad (24)$$

Или в исходных обозначениях:

$$\varphi_n = \left(\varphi_n^0 - \frac{W_0/V}{q/V - a} \right) \cdot e^{-\frac{q}{V} \tau} + \frac{W_0/V}{q/V - a} \cdot e^{-a \tau} \quad (25)$$

Это можно записать так:

$$\varphi_n = \left(\varphi_n^0 - \frac{W_0}{q - a \cdot V} \right) \cdot e^{-\frac{q}{V} \tau} + \frac{W_0}{q - a \cdot V} \cdot e^{-a \tau}, \quad (26)$$

где φ_i^0 - начальное значение φ_i при $\tau = 0$.

Интегрируем уравнение (26):

$$\frac{dy}{dt} = b \cdot (y^* - y) \quad (27)$$

Разделяем переменные:

$$\int_{y_0}^y \frac{dy}{y^* - y} = \int_0^t b \cdot dt \quad (28)$$

$$\lambda n \frac{y^* - y}{y^* - y_0} = -b \cdot t. \quad (29)$$

Отсюда:

$$y = y^* - (y^* - y_0) \cdot e^{-bt}. \quad (30)$$

Или в исходных обозначениях:

$$\varphi_\phi = \varphi_\phi^n - (\varphi_\phi^n - \varphi_\phi^0) \cdot e^{-\frac{q}{V}\tau}, \quad (31)$$

где φ_ϕ^i – начальное значение φ_ϕ при $\tau = 0$.

Значение φ_ϕ находим из формулы (12) в исходных обозначениях:

$$\varphi_\kappa = 0,21(\varphi_\phi^n - \varphi_n - \varphi_\phi). \quad (32)$$

Подставляем в (32) φ_n из формулы (25) и φ_ϕ из формулы (31); получаем решение второй системы при $a = 0$:

$$\varphi_n = \left(\varphi_n^0 - \frac{W_0}{q - 0 \cdot V} \right) \cdot e^{-\frac{q}{V}\tau} + \frac{W_0}{q - 0 \cdot V} \cdot e^{-a\tau}, \quad (33)$$

$$\varphi_n = \left(\varphi_n^0 - \frac{W_0}{q} \right) \cdot e^{-\frac{q}{V}\tau} + \frac{W_0}{q} \cdot 1, \quad (34)$$

т.к. при $a = 0$ $e^{-\frac{q}{V}\tau} = 1$.

В результате решения данных систем дифференциальных уравнений была получена теоретическая модель процесса флегматизации.

Расчет интенсивности испарения нефтепродукта.

Для вычисления интенсивности испарения W , входящей в полученные уравнения, используется критериальное уравнение:

$$W_0 = 150 \cdot \rho \cdot \nu \cdot F_{исп} \cdot \left(\frac{F_{ок}}{V_{св}} \right) \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_D \cdot \pi g \cdot \mu^{0,8} \cdot \theta \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^{0,8}, \quad (35)$$

где ρ – плотность инертного газа; ν – кинематическая вязкость инертного газа; $F_{исп}$ – площадь испарения нефтепродукта; $F_{ок}$ – площадь ограждающих конструкций; $V_{св}$ – свободный объем резервуара; Re – аналог числа Рейнольдса; Pr_D – число Прандтля; πg – давление насыщенных паров; μ – относительная молекулярная масса; θ – температурный фактор; h – длина резервуара; d – диаметр резервуара.

$$Re = \frac{A}{3600 \cdot V}, \quad (36)$$

где A – коэффициент турбулентного обмена, равный:

$$A = \frac{0,25 \cdot q}{(2 \cdot V_{он} \cdot F_{np}^2)^{0,33}} \cdot \left(\frac{V_{он}}{F_{ок}} \right)^{1,33}, \quad (37)$$

где q – расход инертного газа; F_{np} – площадь приточного отверстия; $V_{он}$ – объем газового пространства резервуара.

$$Pr_D = \frac{\nu}{D_0} \left(\frac{273}{T_e} \right)^2, \quad (38)$$

где D_0 – коэффициент диффузии; T_e – температура газа.

$$\pi g = 0,57 \cdot \exp[0,034(T_{ин} - T_{нк})], \quad (39)$$

где $T_{ин}$ – температура нефтепродукта; $T_{нк}$ – температура начала кипения.

$$\mu = 1,55 + 0,0207(T_{нк} - 293), \quad (40)$$

$$\theta = 1,67 + \frac{T_e}{93,6}. \quad (41)$$

Для многокомпонентного нефтепродукта коэффициент, характеризующий скорость изменения интенсивности испарения α в процессе флегматизации, принимался:

$$\alpha = 0,00173 \cdot (T_{кк} - T_{нк}) \cdot \frac{W_0 m_T}{m_0}, \quad (42)$$



где $T_{кк}$ и $T_{нк}$ – соответственно температуры конца и начала кипения нефтепродукта; W_o – интенсивность испарения; m_T – остаток нефтепродукта при определении фракционного состава; m_o – масса нефтепродукта до начала продувки.

В случае однокомпонентного нефтепродукта $\alpha = 0$.

Также использовалась формула:

$$W_{ин} = F_u P_s M (0,734 + 1,637\omega) \cdot 10^{-9}, \quad (43)$$

где $W_{ин}$ – интенсивность испарения; M – молекулярная масса; ω – подвижность среды над зеркалом испарения; P_s – давление насыщенных паров; F_u – площадь испарения.

И формула:

$$W_u = 10^{-6} \cdot \sqrt{M} \cdot \eta \cdot P_s \cdot F_{сп}, \quad (44)$$

где W_u – интенсивность испарения; M – молекулярная масса; η – подвижность среды над зеркалом испарения; P_s – давление насыщенных паров; $F_{сп}$ – площадь испарения.

Для вычисления P_s в формулах (43) и (44) использовалось уравнение Антуана:

$$\lg P_s = A - \frac{B}{C_A + t_n}, \quad (45)$$

где A , B , C_A – константы уравнения Антуана; t_n – температура жидкости.

Также использовалась эмпирическая формула:

$$P_s = \frac{\exp[6,908 + 0,0433 \cdot (t_n - 0,924 \cdot t_B + 2,055)]}{1047 + 7,48 \cdot t_B}, \quad (46)$$

где t_B – температура вспышки нефтепродукта, °C.

Анализ модели процесса флегматизации, составленной по уравнениям материального баланса.

Адекватность представленной теоретической модели процесса флегматизации проверялась сопоставлением полученной теоретической функции $\varphi_{y/n} = f(\tau)$ с результатами экспериментальных измерений по критерию Вилкоксона. Можно сделать вывод, что данная модель адекватна практическим результатам с доверительной вероятностью, равной 0,95.

Недостатком рассмотренной модели процесса флегматизации топливного резервуара является возможность ее применения при условии опорожненности резервуара.

Кроме того, с помощью данной модели возможно определить лишь среднее значение окислителя, содержащегося в резервуаре.

При обеспечении взрывобезопасности топливозаправщиков способом флегматизации в мирное и военное время необходимо знать процентное содержание кислорода в каждой точке свободного пространства резервуара. Это позволит проводить продувку цистерны топливозаправщика до достижения уровня МВСК лишь в локальных участках проведения сварочных работ. Такой подход позволяет существенно сократить сроки продувки резервуара и количество подаваемого инертного газа. Кроме того, при достижении уровня МВСК в точках возможного термического воздействия на резервуар его взрывобезопасность будет обеспечена при любом значении концентрации паров топлива. Это в свою очередь позволяет проводить продувку резервуара без предварительного слива взрывоопасных жидкостей, что является особенно актуальным при выполнении процесса флегматизации емкостей автомобилей подразделений силовых ведомств для хранения и транспортирования топлива в процессе ведения контртеррористических операций.

Проведенные теоретические исследования кинетики процесса наполнения свободного пространства горизонтального топливного резервуара инертным газом, свойств инертных газов и способов продувки ими резервуаров позволяют рассматривать процесс флегматизации как совокупность процессов диффузии и конвективного переноса. В зависимости от физических свойств инертного газа и интенсивности его поступления в резервуар в процессе флегматизации преобладает либо процесс перемешивания, либо процесс вытеснения.

Результатом исследования процесса замещения свободного пространства горизонтального топливного резервуара инертным газом является разработка функциональной схемы математического моделирования процесса флегматизации. Верхняя часть схемы включает исследование вопроса поступления газообразного азота и диоксида углерода в

свободный объем резервуара при различных значениях расхода инертного газа и уровня топлива в резервуаре. Нижняя часть включает аналитическое моделирование процесса флегматизации для случаев преобладающего вытеснения и смешивания. В качестве центрального элемента схемы выступает непосредственно расчет времени процесса флегматизации, объединяющий своей методикой все представленные аспекты.

Список литературы

1. Гришаев М. Е. Спиридонов Е. Г. Обеспечение взрывобезопасности топливозаправщиков способом флегматизации // Современ. методы подгот. специал. и совершенств. систем наземн. обеспеч. авиации: Матер. межвуз. научно-практ. конф. – Воронеж: ВВВАИУ, 2005. – Ч. 2. – С. 299-303.
2. Спиридонов Е. Г. Гришаев М. Е., Уравнение процесса флегматизации свободного пространства горизонтального резервуара для хранения и транспортирования нефтепродуктов // Совершенствование наземного обеспечения авиации и современные аспекты РЭБ в тренажерах и тренажных системах: сб. материалов 5 всероссийской научно-практ. конф. – Воронеж: ВВВАИУ, 2006. – С. 35-37.
3. Жилияков Е.Г. Параллельные вычисления приближенных решений интегральных уравнений Фредгольма первого рода / Е.Г. Жилияков, А.И. Скандаков, Ю.А. Калашникова, О.Н. Иванов // Научные ведомости БелГУ. – 2012. – №1. – С. 144-150.
4. Воронов Е.В., Ланкин О.В., Сумин В.И. Системно-комплексный подход к формированию методологических основ интеллектуальной защиты информации от несанкционированного доступа // Вестник ВГТУ. – 2011. – №8. – С. 174-177.

MODEL OF THE INFORMATION SYSTEM ANALYSIS DYNAMIC PROCESS TO REDUCE DESENSITIZATION FIREFIGHTING OIL

D.B. DESYATOV
A.N. LUKIN
O.YE. RABOTKINA
YE.G. SPIRIDONOV
S.N. TROSTYANSKIY
V.I. FEDYANIN

*Voronezh Institute
of the Russian Federal
Penitentiary*

*e-mail:
a_dushkin@mail.ru*

There is a description of the desensitization approach the tank with the remains of a combustible liquid differential equations of mass balance for hydrocarbons, and oxygen phlegmatizer. These equations represent a system of differential equations of material balance reservoir desensitization process with the remnants of hydrocarbon liquids. Suppose that the process of desensitization, is a process in which the feeding of inert gas at a flow rate q is an intensive mixing of oil vapor, oxygen and an inert gas, and release parogazovozdushnoy mixture of tank volume. The mixing process of steam-air mixture and gas dominates over the process of repression. Inert gas is quite intensive, large petroleum vapor, which causes a constant mass flow in the direction perpendicular to the evaporation area.

Keywords: desensitization, material balance, multicomponent hydrocarbon reservoir.