

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЯЕМОСТИ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ИХ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВАХ

© 2010 Н.А.Самойлов, А.А.-да Консейсао

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа

Поступила в редакцию 14.12.2010

Выполнен анализ ряда методов расчета испарения нефти и нефтепродуктов. Предложен метод расчета испарения с учетом процесса дифференциального испарения при изменении состава жидкой фазы. Обсуждены опытные и расчетные данные по испарению многокомпонентной смеси органических веществ.

Ключевые слова: нефть, нефтепродукты, испарение, моделирование, расчет

Важным элементом оценки экологической ситуации при аварийных разливах углеводородов является расчет их испаряемости, позволяющий оценить загрязнение атмосферы парами и потребность в средствах сбора оставшегося на почве или воде разлитого продукта.

Испарение нефти и нефтепродуктов при их разливах сложный физико-химический процесс, определяемый большим числом факторов (мощность и площадь разлива, физико-химические свойства нефтепродукта, метеорологические условия и т.д.), величина которых в процессе испарения неизбежно будет изменяться; процесс испарения характеризуется постепенным снижением скорости испарения во времени (рис. 1).

В отличие от испарения нефти и нефтепродуктов в закрытых системах (например, в резервуарах), расчет которого, основанный на базе уравнения фазового равновесия, проработан достаточно детально [1, 2], испарение в атмосферу с открытой поверхности определяется весьма приближенно. Так, например, нормативные материалы [3], учитывающие в табличной форме в некоторой степени характеристику испаряющейся нефти по ее плотности в диапазоне от 0.850 до 0.885 т/м³, толщину слоя нефти от 0.001 до 1.5 м, температуру поверхности испарения от 5 до 30 °С и продолжительность испарения от 6 до 240 часов, имеют ряд недостатков, в частности:

- необходимость интерполяции табличных данных, часто в весьма широком диапазоне параметров;

- не указаны допустимые пределы плотности испаряющейся нефти, выходящей за пределы от 0.850 до 0.885 т/м³;

Самойлов Наум Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры нефтехимии и химической технологии. E-mail ANUTIK_N@mail.ru.

Консейсао Агусто Агустиньо-да, доктор технических наук, профессор кафедры нефтехимии и химической технологии. E-mail ROMAGCON@rambler.ru.

- невозможность расчета испарения нефтепродуктов (бензина, дизельного топлива, органических веществ, характерных для нефтехимии);

- не учитывается скорость ветра над поверхностью разлива, приводящего к интенсификации испаряемости нефти и нефтепродуктов [4].

В [4] были получены эмпирические уравнения, учитывающие влияние скорости ветра над поверхностью разлива для ряда нефтепродуктов и нефтей.

Сопоставление опытных данных по испаряемостью Туймазинской и Арланской нефти при отсутствии ветровой нагрузки и нормативных материалов [3] свидетельствует о весьма приближенной оценке анализируемого процесса. Относительная погрешность расчета лежит в пределах 5-19% и определяется в первую очередь тем, что величина плотности нефти не является определяющим фактором испаряемости, так как различные нефти при одинаковой плотности могут иметь различный фракционный состав.

По сравнению с [3] более интересен предложенный в [5] эмпирический метод расчета испаряемости углеводородных систем, учитывающий состав и физико-химические свойства нефтепродукта и скорость ветра, в соответствии с которым испарение смеси углеводородов описывается уравнением:

$$G = \sum_{i=1}^N (40.35 + 30.75U) * 10^{-3} * P_i * x_i * \sqrt{M_i}, \quad (1)$$

где G - количество испаряющихся углеводородов, г/м²·ч;

N - число фракций в нефтепродукте,

U - скорость ветра на высоте 20 см над поверхностью разлива, м/с;

P_i - давление насыщенных паров каждой фракции, Па;

x_i - мольная доля каждой фракции в испаряющейся углеводородной смеси;

M_i - молярная масса фракции, г/моль.

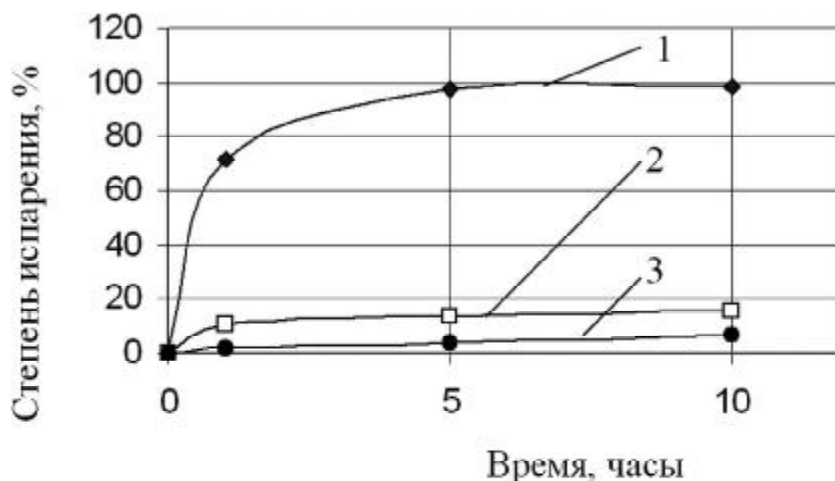


Рис. 1. Испарение во времени разлива автомобильного бензина (1), Туймазинской нефти (2) и дизельного топлива (3) при скорости ветра 0,4 м/с

Недостатком этого метода можно считать принятие постоянства испарения нефтепродукта во времени и отсутствие в [5] данных о погрешности расчета испаряемости.

Оценка приемлемости уравнения (1) как основы для расчета испарения нефтепродуктов выполнена нами в два этапа. На первом этапе выяснялась принципиальная применимость уравнения, на втором предполагалась модификация решения задачи на базе уравнения (1) с учетом постепенного испарения нефтепродукта с изменением его состава.

В связи с этим на первом этапе выполнен анализ применимости уравнения (1) сравнением результатов расчет испарения индивидуальных углеводородов по (1) и по методу Лыкова.

По формуле Лыкова [6], расчет испарения индивидуальных углеводородов Q в г с поверхности F (m^2) за время τ (ч) рассчитывается на основе уравнения Дальтона как:

$$Q = A \frac{MD}{RT} F \tau \frac{P_{ж} - P'_{ж}}{L}, \quad (2)$$

где A – коэффициент, зависящий от величины критерия Рейнольдса Re ;

D – коэффициент диффузии пара испаряющейся жидкости в воздух при температуре T (К), $m^2/ч$;

R – универсальная газовая постоянная ($R = 848/M$), л атм / (К·моль);

$P_{ж}$ – давление насыщенного пара испаряющейся жидкости при температуре T (К), атм;

$P'_{ж}$ – давление пара испаряющейся жидкости в воздухе, атм;

L – длина пути воздушного потока над поверхностью испарения, м.

При Re менее 20000

$$A = 0.5 Re^{0.58}, \quad (3)$$

при Re более 20000

$$A = 0.85 Re^{0.76}. \quad (4)$$

Сравнение расчетов по испарению индивидуальных углеводородов (н-пентана, н-гексана, н-октана и н-декана) по уравнениям (1) и (2) выполнялось для поверхности испарения $0.0067 m^2$ [5] при варьировании скорости ветра от 0 до 5 м/с и продолжительности испарения от 1 до 5 часов. Как следует из табл.1, при расчете испарения индивидуальных углеводородов уравнения (1) и (2) дают достаточно близкие результаты за исключением расчетов при скорости ветра, равной нулю, при которой уравнение (2) неприемлемо. Расхождения между двумя вариантами расчетов испарения нефтепродуктов не превышают 2-10 %отн., причем по мере увеличения продолжительности испарения расхождения существенно уменьшаются. Выполнена объективная оценка гипотезы о не значимости расхождений между двумя методами расчета при наличии ветра по статистическому критерию Стьюдента t . Согласно [7], величина t рассчитывается как

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{Z} + \frac{\sigma_2^2}{Z}}}, \quad (5)$$

где \bar{X}_I – средний результат расчета испарения углеводорода соответственно по уравнениям (1) и (2);

Z – число расчетных значений испарения углеводорода по каждому методу расчета;

σ_I^2 – дисперсия при расчете испарения углеводорода соответственно по уравнениям (1) и (2), рассчитываемая как

Таблица 1. Зависимость испарения углеводородов от скорости ветра

Ско- рость ветра, м/с	Время испа- рения, час	Испарение, г/ час							
		н-пентан		н-гексан		н-октан		н-декан	
		по [1]	по [2]	по [1]	по [2]	по [1]	по [2]	по [1]	по [2]
0	1	123	0	12	0	4	0	0.3	0
	3	370	0	36	0	11	0	1.1	0
	5	617	0	61	0	19	0	1.8	0
1	1	217	224	21	21	7	7	0.6	0.5
	3	653	672	64	64	20	22	1.9	2.0
	5	1088	1121	107	110	34	36	3.2	3.0
2	1	311	335	31	32	10	11	0.9	1.0
	3	935	1000	92	95	30	32	2.8	3.0
	5	1559	1674	153	159	48	54	4.6	5.0
3	1	406	434	40	40	13	14	1.2	1.0
	3	1218	1270	120	121	38	40	3.6	3.0
	5	2030	2116	200	201	63	68	6.0	6.0
4	1	500	501	49	48	15	16	1.4	1.5
	3	1500	1503	147	143	46	48	4.4	4.0
	5	2500	2504	246	238	77	80	7.4	7.0
5	1	594	570	58	54	18	19	1.7	1.5
	3	1782	1710	175	163	55	55	5.3	5.0
	5	2971	2850	292	272	91	92	8.8	9.0
Критерий Стьюдента при скорости ветра 1-5 м/с		0.05		0.07		0.02		0.19	

$$\sigma_i^2 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^Z X_{i,j}^2}{Z-1} - \frac{\left(\sum_{j=1}^Z X_{i,j}\right)^2}{Z(Z-1)}}, \quad (6)$$

где $X_{i,j}$ – результат конкретного J -го расчета испарения углеводорода в г соответственно по уравнениям (1) и (2).

Расчетная величина критерия Стьюдента для всех исследованных углеводородов составляет 0.02-0.19 (табл. 1), она существенно ниже табличного значения критерия Стьюдента для 28 степеней свободы, равного 2.763 [7], что свидетельствует о незначимости расхождений между расчетами испарения углеводородов по уравнениям (1) и (2) при уровне вероятности ошибочности рассматриваемой гипотезы, равной 0.01.

На втором этапе исследования была разработана модель постепенного испарения нефтепродуктов при воздействии ветра при условии изменения состава испаряющейся во времени жидкости на основе уравнения (1), преобразованного в дифференциальную форму

$$dg = \sum_{i=1}^N (40.35 + 30.75U) * 10^{-3} * P_i * x_i * \sqrt{M_i} * d\tau, \quad (7)$$

где dg – количество испаряющихся углеводородов в г/м² за время $d\tau$

Решение задачи методом Рунге-Кутты первого порядка представляет собой интегрирование уравнения (7) во времени с шагами j и промежутками времени по шагам $\Delta\tau$ с расчетом на каждом шаге ядра решения задачи в форме системы уравнений:

$$\begin{aligned} F_{i,j-1} &= F_{j-1} * x_{i,j-1} \\ F_{j-1} &= \sum_{i=1}^N F_{i,j-1} \\ g_{i,j} &= g_{i,j-1} + (4035 + 3075U) * 10^{-3} * P_i * x_{i,j-1} * \sqrt{M_i} * \Delta\tau \\ F_j &= F_{j-1} - \sum_{i=1}^N g_{i,j} \\ x_{i,j} &= \frac{F_{i,j-1} - (4035 + 3075U) * 10^{-3} * P_i * x_{i,j-1} * \sqrt{M_i} * \Delta\tau}{\sum_{i=1}^N F_{i,j-1} - (4035 + 3075U) * 10^{-3} * P_i * x_{i,j-1} * \sqrt{M_i} * \Delta\tau} \\ \tau_j &= \tau_{j-1} + \Delta\tau \end{aligned}$$

при следующих начальных условиях интегрирования:

$$\tau_0 = 0, \quad F_0 = F_{НАЧ} \quad x_{i,0} = x_{i,НАЧ} \quad g_{i,0} = 0 \quad (9)$$

В уравнениях (8) и (9):

F и F_i – соответственно количество неиспарившегося нефтепродукта и его конкретной фракции в разливе, г/м²;

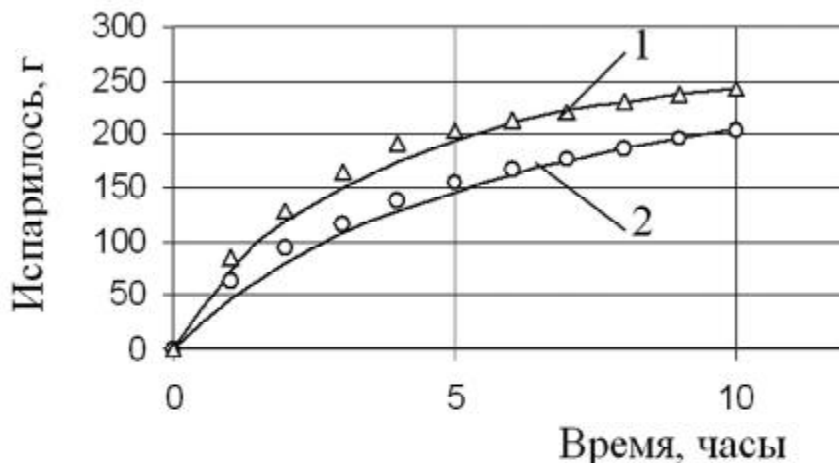


Рис. 2. Испарение модельного разлива во времени
 1 – скорость воздуха 1.2 м/с, зеркало разлива – 143 см²;
 2 – скорость воздуха 0.4 м/с, зеркало разлива – 363 см²;
 линии – расчет по (8), точки – эксперимент.

x_i - концентрация конкретной фракции в разливе, мольные доли;

$g_{i,j}$ - количество конкретной фракции испарившегося нефтепродукта в г/м² к данному моменту времени τ_j .

Рассмотренная модель постепенного испарения многокомпонентной смеси была проверена в опытах по испарению смеси н-гексан, толуол, н-октан, ундекан состава соответственно 0.2608, 0.3426, 0.2241, 0.1724 (мольн. доли) в кюветах при скорости ветра до 2 м/с при различной толщине слоя модельного разлива. Сопоставление результатов экспериментов и расчетов (рис. 2) свидетельствует о приемлемости предлагаемого метода расчета испарения нефти и нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коршаков А.А., Коршаков А.А. (мл.) Расчет потерь нефти и нефтепродуктов при заполнении резервуаров типа РВС с учетом донасыщения их газового пространства // Изв. ВУЗ Нефть и газ. 2008. №4. С. 91-94.
2. Саттарова Д.М., Абузова Ф.Ф., Жерновкова В.И. К расчету величины потерь от испарения нефтепродуктов из резервуаров в условиях интенсификации технологических процессов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1981. №8. С. 24-25.
3. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных трубопроводах. М.: ТрансПресс. 1996. 67 с.
4. Консейсао А.А.-да, Самойлов Н.А. Моделирование процесса испаряемости нефти и нефтепродуктов при их аварийных разливах // Сб статей 2-й Международной научно-технической конференции "Аналитические и численные методы моделирования естественнонаучных и социальных проблем". 4-5 сентября 2007 г. Пенза: Межотраслевой научно-производственный центр. 2007. С.197-200.
5. Методика по нормированию и определению выбросов вредных веществ в атмосферу. М.: ОАО НК Роснефть. 2004. 21с.
6. Серпионова Е.Н. Промышленная адсорбция газов и паров. М.: Высшая школа. 1969. 414 с.
7. Батушнер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. Л.: Химия. 1971. 823 с.

MATHEMATICAL MODELLING OF EVAPORATION OIL AND PRODUCTS BY THEIR ACCIDENT OVERFLOW

© 2010 N.A. Samoilov, A.A.-da Concaicao

Ufa State Petroleum Technological University

It is given analysis same methods calculation of evaporation oil and products. The method calculation of evaporation with take into account process of differential evaporation at modification composition of liquid phase is suggested. The experimental and calculation data by evaporation multicomponent mixture organic substances are discussed.

Keywords: oil, oil products, evaporation, modeling, calculation

Naum Samoilov Aleksandrovich, Dr. Technical Science, Professor at the Petrochemistry and Chemical Technology Department. E-mail ANUTIK_N@mail.ru.

Agusto Concaicao, Dr. Technical Science, Professor at the Petrochemistry and Chemical Technology Department. E-mail ROMAGCON@rambler.ru.