

УДК 517.958:536.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

А.Ю. Шупляк, С.П. Шкарупна

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Приводится математическое описание процесса открытого испарения веществ из нефтешламонакопителей. Исследования аналитического решения позволили выделить четыре основные области протекания процесса испарения углеводородов с открытых поверхностей в зависимости от значений критериальных чисел. На основе полученных результатов предложена упрощенная математическая модель открытого испарения углеводородов, подтверждающая существование указанных областей. Установлено, что испарение веществ с поверхности нефтешлама лимитируется скоростью диффузии веществ в жидкой фазе. Получена зависимость коэффициентов диффузии испаряющихся веществ от температуры и молекулярной массы.

Ключевые слова: нефтесодержащие отходы, математическая модель, испарение, массообмен, скорость диффузии.

Технологический процесс добычи и переработки нефти сопровождается образованием значительного количества нефтесодержащих отходов, или нефтешламов. Нефтешламы накапливаются в шламовых амбарах, ило- и нефтешламонакопителях, ямах аварийного хранения продукта, на полигонах нефтеотходов и др. Подавляющее большинство таких объектов открыто расположены на местности и активно воздействуют на атмосферу [1].

Общие закономерности процесса испарения легких углеводородов, полученные на основе экспериментальных данных, представлены в работе [1, 2]. Экспериментально установлено, что интенсивность испарения углеводородов с поверхности нефтешламов экспоненциально зависит от времени. В существующих в настоящее время методах оценки скорости испарения нефтесодержащих отходов учитывают только испарение углеводородов с поверхности жидкости на границе раздела фаз [2]. Результаты экспериментального исследования процесса испарения многокомпонентных углеводородосодержащих смесей для открытых систем позволяют сделать вывод о влиянии также массопереноса веществ внутри жидкой фазы на процесс их испарения [1].

Полное математическое описание процесса испарения многокомпонентной жидкости для открытых систем с учетом массопереноса веществ в жидкой фазе при постоянной температуре приведено в [3, 4]:

$$\frac{\partial}{\partial t} C_i(x, t) = D_i \frac{\partial^2}{\partial x^2} C_i(x, t) \text{ при } h(t) < x < \infty, i \in [1..N]; \quad (1)$$

Анатолий Юрьевич Шупляк, инженер кафедры «Химическая технология и промышленная экология».

Светлана Петровна Шкарупна (к.х.н., доц.), доцент кафедры «Химическая технология и промышленная экология».

$$J_i(t) = C_i(x, t) dh(t) / dt + D_i \partial C_i(x, t) / \partial x \text{ при } x = h(t), i \in [1..N]; \quad (2)$$

$$C_i(x, t) = C_{0,i} \text{ при } t = 0, i \in [1..N]; \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} h(t) = \sum_{i=1}^N [J_i(t) / \rho_i], i \in [1..N]; \quad (4)$$

$$h(t) = 0 \text{ при } t = 0; \quad (5)$$

$$J_i(t) = \varepsilon p_i Y_i(t) \sqrt{\mu_i / (2\pi RT)}; \quad (6)$$

$$Y_i(t) = (C_i(x, t) / \mu_i) / \sum_{j=1}^N [C_j(x, t) / \mu_j] \text{ при } x = h(t); \quad (7)$$

$$\partial C_i(x, t) / \partial x = 0 \text{ при } x = H, \quad (8)$$

где t – время;

x – координата в жидкой фазе перпендикулярно границе раздела фаз (начало координат соответствует нахождению границы раздела фаз в начальный момент времени);

i – порядковый номер компонента;

$C_{0,i}$, C_i – начальная концентрация и концентрация в произвольный момент времени i -го компонента;

D_i , J_i , μ_i , p_i , ρ_i – коэффициент диффузии, интенсивность испарения, молярная масса, давление насыщенных паров и плотность i -го компонента соответственно;

Y_i – мольная доля компонента в растворе на границе раздела фаз;

$h(t)$ – функция зависимости координаты границы раздела фаз от времени;

N – число веществ в растворе;

ε – эмпирический коэффициент, зависящий от движения воздушных масс над поверхностью жидкости [3].

Краевая задача (1)-(8) может быть решена только численными методами. Однако возможность получения численного решения ограничена наличием данных о химическом составе нефтесодержащего отхода и литературными данными по коэффициентам диффузии испаряющихся веществ в жидкой фазе. Поэтому для проверки применимости модели необходимо рассмотреть стадии процесса испарения веществ, которые позволяют исключить параметры, оказывающие пренебрежимо малое воздействие на систему. В этом случае возможно аналитическое решение математической модели с целью определения коэффициентов диффузии испаряющихся веществ в жидкой фазе на основе экспериментальных данных.

В качестве одной из таких областей можно рассмотреть испарение сильно разбавленного раствора, где в качестве растворителя выступает плохо испаряющееся вещество [3]. Для глубины H для разбавленного раствора решением задачи является функция

$$J_i^H(t) = 2 \frac{D_i C_{0,i}}{H_{eff}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda_{k,i} \xi_{n,i}^2 \exp(-\chi_{n,i} Fo_i)}{\chi_{n,i}^2 / (\lambda_{k,i} - 2\lambda_{b,i}) + \chi_{n,i} (1 + \lambda_{k,i}) - \lambda_{b,i} \lambda_{k,i}}, \quad (9)$$

где $t \in [0..t_{\max}]$, $\lambda_{b,i}$, $\lambda_{k,i}$, $\chi_{n,i}$ – безразмерные критериальные числа, определяемые выражениями:

$$\lambda_{b,i} = Pe_i / 2 = (b H_{eff} / D_i) / 2; \quad (10)$$

$$\lambda_{k,i} = k_i H_{eff} / D_i; \quad (11)$$

$$\chi_{n,i} = \xi_{n,i}^2 + \lambda_{b,i}^2, \quad (12)$$

где $Pe_i = b H_{eff} / D_i$, $Fo_i = D_i \chi_{n,i} t / H_{eff}^2$ – диффузионные критерии Пекле и Фурье;

b – усредненная скорость движения границы раздела фаз (стефановского потока);

k_i – коэффициент скорости испарения i -го компонента:

$$k_i \approx \varepsilon \mu_1 p_i / (\rho_1 \sqrt{2\pi \mu_1 RT}), \quad (13)$$

μ_1 , ρ_1 – молярная масса и плотность плохо испаряющегося компонента, накапливающегося на поверхности; $\xi_{n,i}$ – множество положительных корней следующего трансцендентного уравнения на отрезках $(n\pi; n\pi + \pi/2)$, $n = [0.. \infty)$:

$$\tan(\xi_{n,i}) / \xi_{n,i} = (\lambda_{k,i} - 2\lambda_{b,i}) / (\xi_{n,i}^2 + \lambda_{k,i} \lambda_{b,i} - \lambda_{b,i}^2), \quad (14)$$

при больших значениях переменной t

$$J_i^H(t) \approx A_{3,i} \exp(-A_{4,i} t); \quad (15)$$

$$A_{3,i} = \frac{1}{H_{eff}} \frac{2C_{0,i} D_i \lambda_{k,i} \xi_0^2}{\chi_{0,i}^2 / (\lambda_{k,i} - 2\lambda_{b,i}) + \chi_{0,i} (1 + \lambda_{k,i}) - \lambda_{b,i} \lambda_{k,i}}; \quad (16)$$

$$A_{4,i} = \chi_{0,i} Fo_i, \quad (17)$$

где $\chi_{0,i}$ – характеристическая функция, зависящая от критериальных чисел λ_k , $\lambda_{b,i}$, учитывающих скорость испарения веществ с поверхности, скорость стефановского потока и скорость диффузионного потока [3].

Значения критериальных чисел позволяют определить область протекания процесса испарения веществ. Применимость модели слоем жидкости конечной толщины ограничена областью существования решений трансцендентного уравнения (14) [3]:

$$\lambda_{b,i} < 1 + 0,5\lambda_{k,i} - 0,5\sqrt{\lambda_{k,i}^2 + 4}, \quad \lim_{\lambda_{k,i} \rightarrow \infty} \lambda_{b,i} < 1. \quad (18)$$

Выражение (9) содержит ряд усредненных параметров, вносящих погрешность, поэтому целесообразно провести исследование влияния параметров критериальных чисел на точность полученных решений введением допустимого процента потери качества модели ($\Delta_{\text{доп}} = 1\%$):

$$(f - f_{\text{нр}}) / f \cdot 100\% \leq \Delta_{\text{доп}}, \quad (19)$$

где f – значения оригинальной функции;

f_{ynp} – значения, принимаемые упрощенной функцией.

Используя выражение (19), получим критерий пренебрежимо малого воздействия стефановского потока ($\lambda_{b,i} \rightarrow 0$):

$$\lambda_{b,i} < 1 + 0,5\lambda_{k,i} - \sqrt{(1 + 0,5\lambda_{k,i})^2 - 0,04\lambda_{k,i} / 1,01}, \quad \lim_{\lambda_{k,i} \rightarrow \infty} \lambda_{b,i} < 0,01. \quad (20)$$

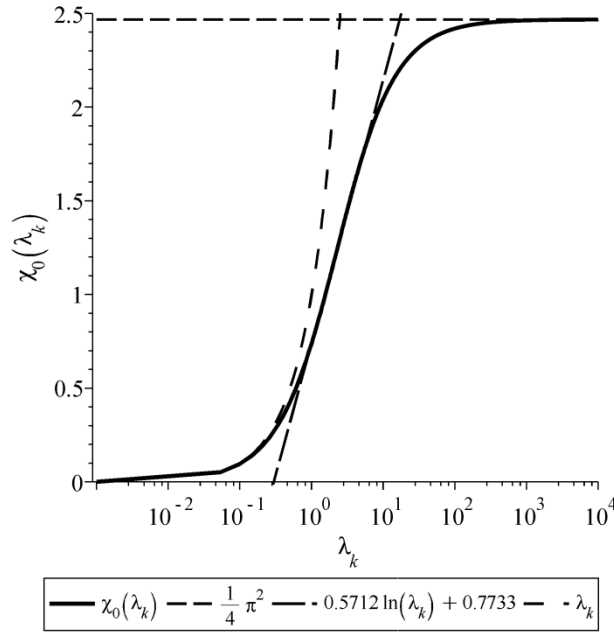


Рис. 1. График функции $\chi'(\lambda_b)$

При $\lambda_{b,i} \rightarrow 0$ получаем следующие зависимости $\chi_{0,i}$ от значений $\lambda_{k,i}$ (рис. 1):

$$\chi_{0,i}(\lambda_{k,i}) \approx \pi^2/4, \quad \lambda_{k,i} \geq 200; \quad (21)$$

$$\chi_{0,i}(\lambda_{k,i}) \approx A_5 + A_6 \ln(\lambda_{k,i}), \quad 1 \leq \lambda_{k,i} \leq 6; \quad (22)$$

$$\chi_{0,i}(\lambda_{k,i}) \approx \lambda_{k,i}, \quad \lambda_{k,i} \leq 0,03. \quad (23)$$

Таким образом, для разбавленного раствора получены четыре основные области протекания процесса испарения для каждого вещества:

- 1) лимитирующая стадия «диффузия вещества в жидкой фазе» ограничена выполнением условий (20) и (21);
- 2) лимитирующая стадия «испарение вещества с поверхности раздела двух фаз» ограничена выполнением условий (20) и (23);
- 3) смешанная область, характеризующаяся отсутствием доминирующих параметров, ограничена выполнением условия (18);
- 4) модель бесконечного слоя жидкости характеризуется невыполнением условия (18).

Для первой области интенсивность испарения i -го компонента не зависит от критериальных чисел $\lambda_{k,i}$, λ_b и лимитируется только диффузией вещества в растворе. Для второй области скорость испарения не зависит от коэффициента диффузии и определяется коэффициентом скорости испарения веществ с поверхно-

сти раздела фаз. Если условие (23) выполняется для всех растворенных веществ, то система дифференциальных уравнений (1)–(8) примет вид

$$\frac{d}{dt}m_i(t) = -\frac{\varepsilon S p_i}{\sqrt{2\pi\mu_i RT}} m_i(t) \sum_{j=0}^N (m_j(t)/\mu_j), \quad i \in [0..N], \quad t \in [0..\infty]; \quad (24)$$

$$m_i(t) = m_{0,i}, \quad i \in [0..N], \quad t = 0, \quad (25)$$

где $m_{i,0}$, m_i – начальная масса и масса в произвольный момент времени i -го компонента в растворе;

S – площадь зеркала испарения.

Аналитическое решение задачи (24)–(25) можно выразить в виде n трансцендентных уравнений:

$$\sum_{j=0}^N \left[\frac{m_{0j}}{p_j \sqrt{\mu_j}} [m_i(t)/m_{0i}]^{\alpha_{j,i}} \right] + \varepsilon \frac{St}{\sqrt{2\pi RT}} = \sum_{j=1}^n \left[\frac{m_{0j}}{p_j \sqrt{\mu_j}} \right], \quad i \in [0, N]. \quad (26)$$

Интенсивность испарения определяется дифференцированием выражения (26) в виде

$$J_i(t) = \frac{\varepsilon p_i}{\sqrt{2\pi\mu_i RT}} / \sum_{j=0}^N [m_{0j} [m_i(t)/m_{0i}]^{\alpha_{j,i}-1} / \mu_j], \quad i \in [0..N], \quad (27)$$

где $J_i = -S^{-1} dm_i(t)/dt$ – интенсивность испарения;

$m_i(t)$ определяется решением трансцендентного уравнения (26).

Проверка полученных решений (9)–(14), (26)–(27) выполнялась посредством аппроксимации экспериментальных данных. Поскольку в модели присутствуют неизвестные величины – коэффициент ε , значения коэффициентов диффузии веществ и концентраций компонентов в нефтешламе, которые необходимо учитывать при обработке экспериментальных данных, рассмотрим преобразование (26)–(27) относительно неизвестных величин. Из выражения (27) методом наименьших квадратов можно получить значение неизвестного коэффициента:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sqrt{2\pi RT} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{u=1}^n J_{j,u} / (p_j \sqrt{\mu_j}) \right], \quad (28)$$

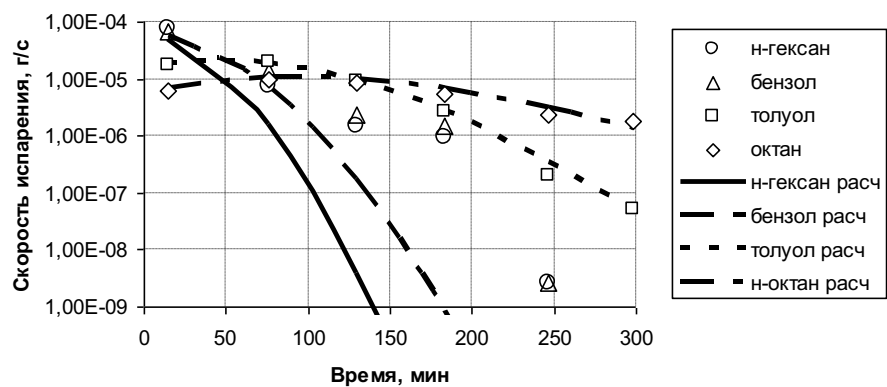
где $J_{j,u}$ – значение интенсивности испарения, определяемое из опыта и соответствующее времени $t_{j,u}$.

Коэффициент ε можно также определить из формулы (26):

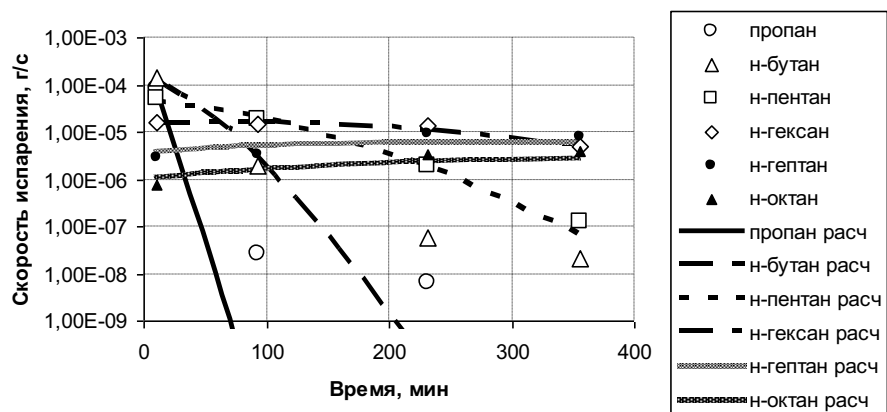
$$\varepsilon = \frac{1}{tS} \sqrt{2\pi RT} \sum_{j=0}^N \left[m_{0j} \left(1 - [m_i(t)/m_{0i}]^{\alpha_{j,i}} \right) / (p_j \sqrt{\mu_j}) \right], \quad (29)$$

где значение массы i -го компонента определяется из трансцендентного уравнения, получаемого аналитическим решением модели (26)–(27) через изменение массы испаряющейся жидкости:

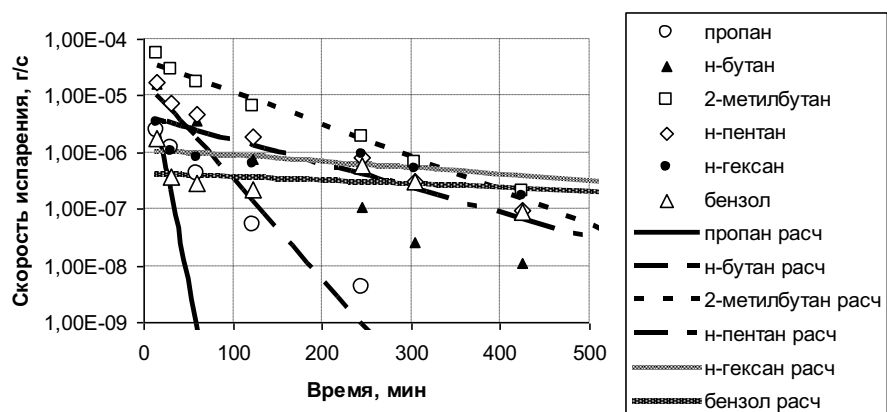
$$\sum_{j=0}^N \left[m_{0j} (m_i(t)/m_{0i})^{\alpha_{j,i}} \right] = \sum_{j=0}^N m_j(t). \quad (30)$$



a



б



в

Рис. 2. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.
Скорости испарения индивидуальных компонентов:
a – н-гексан, бензол, толуол, н-октан, н-додекан; *б* – бензин; *в* – бензин в н-додекане

Усредненное значение стефановского потока определяется из формулы

$$b = \Delta H / t_{\text{эксп}}, \quad (31)$$

где ΔH – изменение толщины слоя испаряющейся жидкости за время проведения эксперимента;

$t_{\text{эксп}}$ – время проведения эксперимента.

Для проверки предложенного решения проведена серия экспериментов по методике, описанной в [1], с использованием специально приготовленных модельных смесей следующего состава: 1 – смесь н-гесана, бензола, толуола, н-октана, н-додекана в объемном соотношении 1:1; 2 – стандартный бензин с октановым числом 92; 3 – раствор бензина в н-додекане. Результаты аппроксимации представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Результаты определения коэффициента ε разными методами и коэффициент достоверности аппроксимации

Наименование	Коэффициент ε			Коэффициент достоверности
	Формула (28)	Формула (29)	Численный метод	
Смесь 1	1,30	3,41	3,65	0,980
Смесь 2	2,02	2,47	2,70	0,994
Смесь 3	0,69	1,68	1,92	0,387

Из табл. 1 следует, что результаты расчета по формуле (28) дают существенную погрешность, которая уменьшается по мере увеличения экспериментальных данных об интенсивности испарения всех веществ. Разность между расчетом по формуле (29) и решением численными методами определяется погрешностью определения интенсивности испарения индивидуальных компонентов.

Анализ результатов обработки опытов по модели (26)-(27) позволяет заключить, что при высокой концентрации легко испаряющихся веществ результаты аналитического расчета в целом соответствует экспериментальным данным, но для конкретного вещества может наблюдаться их расхождение. По мере снижения концентрации испаряющихся веществ погрешность увеличивается.

Таким образом, модель (26)-(27) применима для расчета суммарной скорости испарения смеси, состоящей преимущественно из быстро испаряющихся компонентов, но расчет испарения отдельных компонентов может давать значительную погрешность. Для расчета испарения смеси, содержащей большое количество высококипящих компонентов, модель (26)-(27) неприменима.

Для модели (9)–(14) преобразуем выражение (11):

$$\lambda_{k,i} = \frac{\varepsilon \mu_{cm} p_{n,i} H_{eff}}{\rho_{cm} D_i \sqrt{2\pi \mu_i RT}} = \frac{\varepsilon \mu_{cm} H_{eff}}{\rho_{cm} \sqrt{2\pi RT}} \frac{p_{n,i}}{D_i \sqrt{\mu_i}} = \frac{\varphi \psi_i H_{eff}}{D_i \sqrt{2\pi RT}}, \quad (32)$$

где φ – постоянная, зависящая от условий проведения опыта;

ψ_i – константа, характеризующая индивидуальные свойства компонента в смеси, определяемые выражениями:

$$\varphi = \varepsilon \mu_{cm} / \rho_{cm}, \quad (33)$$

$$\psi_i = p_{n,i} / \sqrt{\mu_i}. \quad (34)$$

Исходя из формул (32) – (34), запишем выражение (9) в виде

$$J_i(t) = C_{0,i} I(\varphi, D_i, \psi_i, b, H_{eff}, t), \quad (35)$$

где

$$I(\varphi, D_i, \psi_i, b, H_{eff}, t) = 2 \frac{D_i}{H_{eff}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda_{k,i} \xi_{n,i}^2 \exp(-\chi_{n,i} F o_i)}{\chi_{n,i}^2 (\lambda_{k,i} - 2\lambda_{b,i}) + \chi_{n,i} (1 + \lambda_{k,i}) - \lambda_{b,i} \lambda_{k,i}}, \quad (36)$$

λ_k определяется по выражению (32).

Полученное выражение (35) содержит три неизвестных коэффициента – один линейный $C_{0,i}$ и два нелинейных φ , D_i , которые можно получить аппроксимацией экспериментальных данных. Величина $C_{0,i}$ постоянна для всех обрабатываемых опытов, величина φ постоянна для всех веществ в индивидуальном опыте, величина D_i индивидуальна для каждого компонента и зависит от температуры.

Для определения неизвестных параметров необходимо отыскать минимум функции по переменным φ , D_i , u :

$$\delta(\varphi, C_{0,i,u}, D_{i,u}, \psi_{i,u}) = \sum_{i=1}^{n_{вещ}} \sum_{j=1}^{n_{точ}} [J_{i,j,u}^{экс} - C_{0,i,u} I(\varphi, D_{i,u}, \psi_{i,u}, b_u, H_{eff}, t_j)]^2, \quad (37)$$

где $n_{вещ}$ – число анализируемых веществ; $n_{точ}$ – число экспериментальных точек, соответствующих определенному промежутку времени.

Таблица 2

Результаты обработки экспериментальных данных по испарению бензина в полифениловом эфире

Компонент	Коэфф. диффузии, $10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$	Коэфф. достоверности	Концентрация, $\text{г}/\text{м}^3$		Отн. погрешность, %
			$C_{расч}$	$C_{эксп}$	
Пропан	2,06	0,973	219	194	13
Изобутан	1,54	0,923	1552	1477	5
Бутен-1	1,81	0,955	681	643	6
Н-бутан	1,84	0,956	1743	1749	0,3
Бутен-2t	2,11	0,960	607	667	9
Бутен-2с	1,77	0,939	493	609	19
3-метилбутен-1	1,68	0,901	104	112	7
2-метилбутан	1,23	0,858	8882	9896	10
Пентен-1	1,47	0,848	286	362	21
2-метилбутен-1	1,23	0,807	522	659	21
Н-пентан	1,88	0,817	2618	3633	28

В выражении (37) начальное значение концентраций испаряющихся компонентов определяется методом наименьших квадратов, остальные три неизвестных величины определяются численными методами.

Данный алгоритм был апробирован для модельной смеси бензина (концентрация 0,1222 г/мл) в полифениловом эфире и для нефтешлама Нефтегорского

нефтестабилизирующего предприятия с прудов дополнительного отстоя (ПДО). Результаты аппроксимации опыта бензина с полифениловым эфиром представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что при высоких значениях коэффициентов достоверности ($>0,9$) средняя погрешность не превышает 8,5 % и в единичном опыте достигает 20 %.

Для нефтешлама с ПДО результаты поиска минимума функции отражены на графике (рис. 3), из которого видно, что функция (37) не имеет четко выраженного минимума. Следовательно, влиянием коэффициента φ можно пренебречь и зависимость находится в области, определяемой выражением (22).

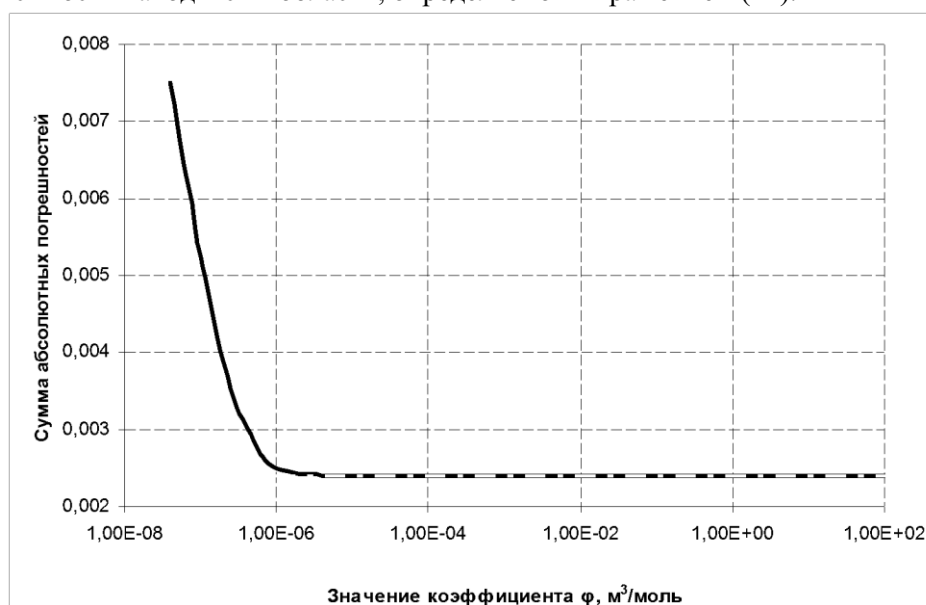


Рис. 3. Зависимость суммарной абсолютной погрешности от φ

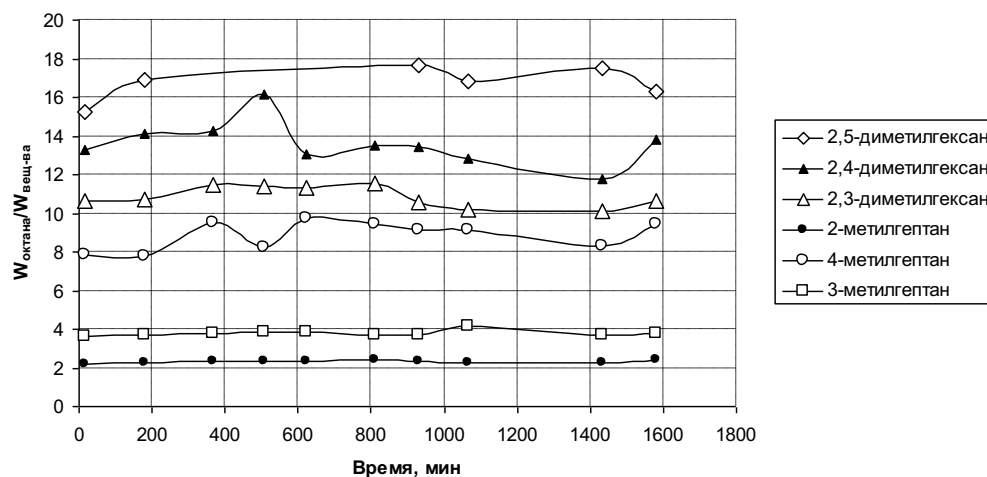


Рис. 4. Зависимость отношения скоростей испарения октана к его изомерам для различных промежутков времени

С учетом анализа данных, полученных при первичной математической обработке, была выдвинута гипотеза о зависимости коэффициентов диффузии от мо-

лярных масс компонентов. На рис. 4 отображены отношения экспериментальных скоростей испарения веществ с одинаковой молекулярной массой для различных промежутков времени.

Аппроксимацией полученных значений коэффициентов диффузии, рассчитанных в результате математической обработки экспериментальных данных для температур от 30 до 70 °С по веществам с температурами кипения от пропана до октана, была получена следующая формула:

$$D_T = 0,2149\mu^{-0,5} \exp(-5386/T). \quad (38)$$

Графические результаты аппроксимации представлены на рис. 5 и 6.

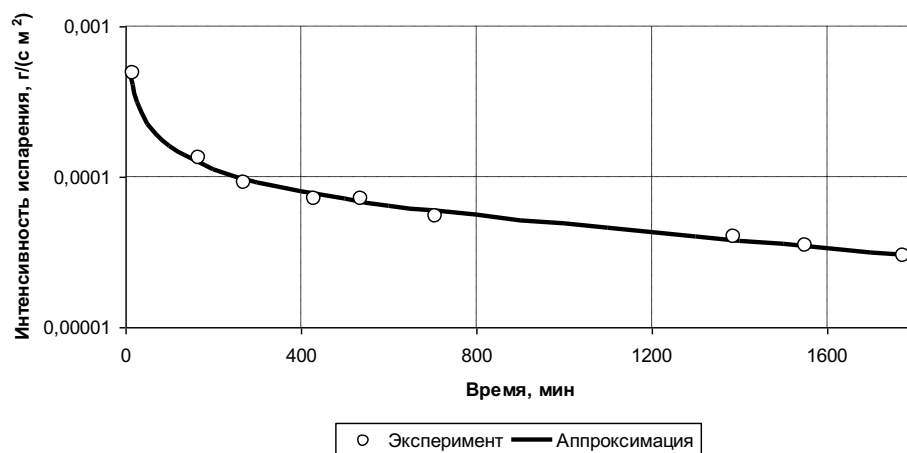


Рис. 5. Изменение интенсивности испарения н-пентана из нефтешлама с ПДО при 30 °С

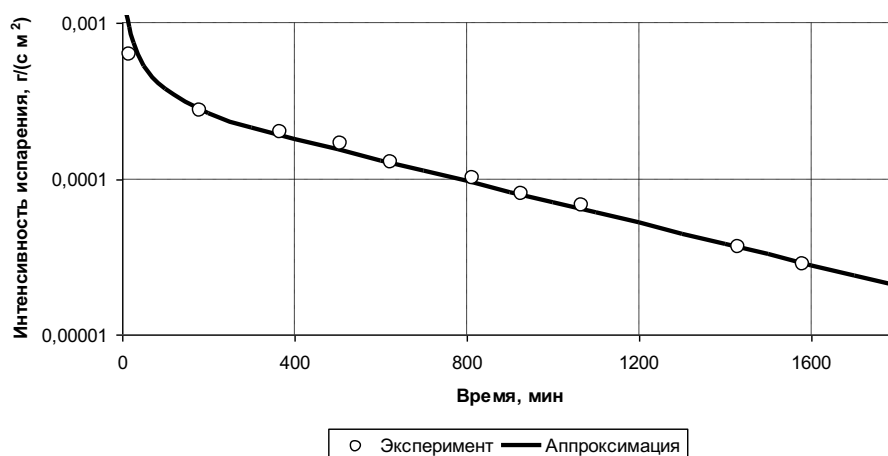


Рис. 6. Изменение интенсивности испарения н-пентана из нефтешлама с ПДО при 70 °С

Таблица 3

Усредненные значения скорости стефановского потока и $\lambda_{b,i}$

Температура, °С	Скорость стефановского потока, м/с	Значение $\lambda_{b,i}$	
		Минимальное	Максимальное
30	$3,866 \cdot 10^{-9}$	0,062	0,102
50	$8,484 \cdot 10^{-9}$	0,046	0,074
60	$1,220 \cdot 10^{-8}$	0,040	0,064
70	$1,603 \cdot 10^{-8}$	0,033	0,053

Таким образом, в результате математической обработки экспериментальных данных процесса испарения углеводородов в открытых системах установлено, что модель (24)–(25), не учитывающую диффузию веществ в жидкой фазе, можно применять только для легкоиспаряющихся жидких смесей. Для расчета испарения углеводородов с открытой поверхности нефтешламонакопителей следует применять модель (1)–(8).

Установлено, что испарение компонентов может происходить в разных режимах в зависимости от значений критериальных чисел $\lambda_{b,i}$, $\lambda_{k,i}$, для которых получены приближенные аналитические решения. Значения коэффициентов диффузии компонентов испаряющихся из раствора веществ, коэффициента аккомодации ϵ можно определить на основе упрощенной модели (9)–(14) аппроксимацией экспериментальных данных. Из полученных аналитических решений выведены формулы, позволяющие определить начальный состав испаряющейся жидкости. На основе экспериментальных данных по испарению модельных смесей получена зависимость коэффициентов диффузии веществ от температуры и молекулярной массы.

Зная распределение температуры в слое жидкости в любой момент времени, можно определить текущую интенсивность испарения. Полученная математическая модель, описывающая кинетику испарения углеводородов с поверхности объектов накопления жидких нефтесодержащих отходов, позволяет охарактеризовать интенсивность поступления в воздушную среду паров легковоспламеняющихся или токсичных углеводородов. Из приведенных формул и результатов расчета видно, что ключевыми параметрами, характеризующими потенциальную опасность накопителя с течением времени, являются концентрация испаряющихся веществ и глубина накопителя. Таким образом, можно прогнозировать выброс от нефтешламонакопителей в зависимости от их «возраста» и сезона, а также оценить экологический риск эксплуатации накопителей нефтесодержащих отходов [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шупляк А.Ю. Кинетика испарения углеводородов с поверхности объектов накопления нефтесодержащих отходов / А.Ю. Шупляк, С.П. Шкаруппа // Нефть. Газ. Новации. – 2011. – № 1. – С. 72-75.
2. Шупляк А.Ю. Математические модели испарения многокомпонентных углеводородсодержащих смесей // А.Ю. Шупляк, С.П. Шкаруппа. Деп. в ВИНТИ 19.12.2013, №377-В2013. – 52 с.: ил. 5; библиогр.: 120 назв. – Рус. – № 2, 2014.
3. Шупляк А.Ю. Математическое моделирование массопереноса в процессе испарения многокомпонентных жидкостей / А.Ю. Шупляк, С.П. Шкаруппа, А.М. Штеренберг // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2013. – № 3(32). – С. 98-109.

4. *Кульчицкий А.В.* Математическое моделирование процессов испарения в многокомпонентных средах: Дис. ... канд. физ-мат наук / А.В. Кульчицкий. – М., 1999. – 168 с.
5. *Шупляк А.Ю., Шкаруппа С.П.* Оценка риска для здоровья персонала при эксплуатации объектов накопления нефтесодержащих отходов / Известия Самарского научного центра РАН. Т. 15. – 2013. – № 3(6). – С. 2016-2020.

Статья поступила в редакцию 27 мая 2014 г.

PROCESS EVAPORATION MODELING OF THE HYDROCARBONACEOUS WASTES

A.Yu. Shuplyak, S.P. Shkaruppa

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Mathematical description of the open evaporation process of substances from accumulators of oil slime is given. The analytical solution researches of the allow to identify four basic parts of the evaporation process of hydrocarbons from exposed surfaces depending on the values of criterion numbers. The results obtained suggest a simplified mathematical model of open evaporation of hydrocarbons confirming the existence of these parts. The substances evaporation from the surface of oil slime is limited by the diffusion rate of substances in the liquid phase. The dependence of the diffusion coefficients of volatile substances from the temperature and molecular weight is received.

Keywords: *oil product waste, mathematical model, evaporation, mass-transfer, diffusion rate.*