

**КРИТЕРИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ МАССООТДАЧИ
ПРИ ОПЕРАЦИЯХ С НЕФТЯМИ
В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРАХ**

Любин Е.А., Коршак А.А.

*Санкт-Петербургский государственный горный институт
имени Г.В. Плеханова (технический университет)
email: Lyubin.evgeniy@gmail.com*

Получены новые критериальные уравнения массоотдачи при различных операциях, проводимых с нефтями (простой, опорожнение, заполнение резервуара). Данные уравнения необходимы для расчета потерь нефти от испарения. Проведено сравнение с ранее существовавшими критериальными уравнениями, выявлены их недостатки, которые были устранены в ходе получения новых зависимостей. Рассчитаны погрешности полученных формул.

Ключевые слова: потери нефти, испарение нефти, критериальные уравнения, паровоздушная смесь, массоотдача, простой, опорожнение и заполнение резервуара, методика расчёта потерь нефти, концентрация паров, динамика испарения нефти, Kt - критерий

В настоящее время известен ряд методик по расчету потерь нефти от испарения, хотя, к сожалению, оценка погрешности, существующих методик не проводилась. Полученные формулы для нефтей применимы только к узкому их количеству. То есть, можно сказать, что формул для расчета потерь, которые могли бы использоваться для всех нефтей независимо от свойств и состава на данный момент не существует. Поэтому в расчетах нередко применяют формулы, полученные для бензинов.

Для правильной же оценки фактических потерь из стальных вертикальных цилиндрических резервуаров необходимо уметь прогнозировать концентрацию паров углеводородов в газовом пространстве (ГП) резервуаров. Для этого при развитии методов расчета потерь нефти от испарения вводится в использование коэффициент массоотдачи β . Данный коэффициент имеет размерность $[\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})]$.

Умноженный на движущую силу $\frac{C_s - C}{1 - C}$, он показывает, какое количество нефти испаряется с единицы поверхности «зеркала» нефтепродукта в единицу времени.

Для расчета потерь нефти от испарения профессор Ф.Ф. Абузова [1] предложила следующее уравнение:

$$G = \beta \cdot F_p \cdot \frac{C_s - C}{1 - C} \cdot \tau, \quad (1)$$

где β – коэффициент массоотдачи, кг/(м²·ч);

F_p – площадь «зеркала» нефти в резервуаре, м²;

C_s – концентрация насыщенных паров нефти;

C – средняя концентрация паров нефти в газовом пространстве;

τ – продолжительность испарения, ч.

Для использования формулы (1) необходимо определять величину коэффициента β , используя различные критериальные уравнения массоотдачи [2, 3].

Так, А.В. Филлитов [2] на основе экспериментов по определению потерь летучих фракций нефти на нефтепромыслах Татарии и объектах ОАО «Северо-Западные магистральные нефтепроводы» предложил находить коэффициент массоотдачи с использованием зависимости

$$Nu_{д.бд} = Nu_{д.мд} + 13,3 \cdot Re^{0,535} \cdot Pr_{д}^{0,33}. \quad (2)$$

К сожалению, формула справедлива только для резервуаров РВС 5000 и только нефтей рассмотренного региона.

В работе [3] рассматриваются результаты экспериментов по изучению испарения нефти при заполнении резервуаров РВС 2000, РВС 5000 и ЖБР 10000 с различной скоростью. Условия экспериментов были следующими:

- температура закачиваемой нефти – 290 К,
- давление насыщенных паров по Рейду – 38000 Па,
- газовый фактор – 0,3 м³/м³.

То есть закачиваемая в резервуары нефть содержала к тому же растворенный и окклюдированный газ.

Обработка результатов экспериментов позволила получить критериальное уравнение вида

$$Nu_3 = 0,955 \cdot Re_{3*}^{0,898} \cdot Sc^{-0,343} \cdot \left(\frac{P_*}{P_\Gamma}\right)^{0,0164} \cdot \left(\frac{H_\Gamma}{D_P}\right)^{-0,0009}, \quad (3)$$

где Nu_3 , Re_{3*} – числа Нуссельта и Рейнольдса при закачке:

$$Nu_3 = \frac{\varphi_M \cdot D_P}{D_M}; \quad Re_{3*} = \frac{u_\Gamma \cdot D_P}{\nu_{см}}; \quad (4)$$

φ_m – коэффициент массообмена;

D_p – диаметр резервуара, м;

u_Γ – скорость восходящего потока газа, $u_\Gamma = 1,0856 u_{ж}$;

$u_{ж}$ – скорость подъема уровня жидкости в резервуаре при закачке;

$\nu_{см}$ – кинематическая вязкость, m^2/c ;

Sc – число Шмидта, $Sc = \nu_{пвс} / D_m$;

D_m – коэффициент диффузии паров нефти, $m^2/ч$:

$$D_m = a_m + b_m \cdot T; \quad (5)$$

a_m, b_m – эмпирические коэффициенты, постоянные для каждой нефти;

$\frac{P_*}{P_\Gamma}$ – безразмерный комплекс, характеризующий степень насыщенности

ГП парами нефти;

H_Γ – высота газового пространства, м.

Сведений о погрешности вычислений Nu_3 по формуле (3) авторы [3] не приводят. Однако отмечают, что последние два сомножителя в ней малозначимы.

Впоследствии, отбросив незначимые сомножители, авторы [3] получили на том же экспериментальном материале формулу [4]

$$Nu_3 = 0,955 \cdot Re_{3*}^{0,905} \cdot Sc^{-0,343}. \quad (6)$$

К сожалению, формулы (3), (6) также носят частный характер. Кроме того, они справедливы только для рассмотренной нефти, содержащей газ. Но даже для них не приводится ни сведений о пределах изменения входящих в зависимости параметров, ни о погрешностях вычислений.

На основании экспериментов по опорожнению резервуаров РВС 20000 и ЖБР 10000, а также по заполнению резервуаров РВС 20000 усть-балыкской нефтью в работе [5] получены следующие критериальные уравнения массоотдачи:

– при опорожнении резервуара:

$$Sh_{от} = 0,02 \cdot Re_{от}^{0,84} \cdot Sc^{-2,10} \cdot \left(\frac{d_3}{D_p}\right)^{1,24} \cdot \left(\frac{P_i}{P}\right)^{-2,49}; \quad (7)$$

– при заполнении резервуара:

$$Sh_3 = 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot Re_3^{0,81} \cdot Sc^{-1,45} \cdot \left(\frac{P_i}{P}\right) \cdot (1 + Gr)^{0,6}, \quad (8)$$

где $Sh_{от}$, Sh_3 – число Шервуда, соответственно при опорожнении, заполнении резервуара;

$Re_{от}$, Re_3 – числа Рейнольдса при опорожнении и заполнении резервуара, характеризующее соответственно скорость омывания поверхности нефти воздухом при опорожнении резервуаров и перемешивание нефти при их заполнении:

$$Re_{от} = 0,788 \cdot \frac{U \cdot d_3}{\nu_{пвс}} \cdot \sqrt{N_k}; \quad (9)$$

U – скорость струи воздуха у поверхности откачиваемой нефти, м/с

$$U = 14,378 \cdot \frac{U_0}{3,56 + \frac{H_r}{r}}; \quad (10)$$

U_0 – скорость струи воздуха в монтажном патрубке дыхательного клапана, м/с:

$$U_0 = \frac{Q_{от}}{\pi \cdot r^2 \cdot N_k}; \quad (11)$$

$Q_{от}$ – расход откачки нефти, м³/с;

r – радиус монтажного патрубка, м;

N_k – число дыхательных клапанов, установленных на резервуаре;

H_r – начальная высота ГП за время операции, м;

d_3 – диаметр круга, эквивалентного площади, омываемой струей подсосываемого воздуха в резервуаре, м:

$$d_3 = 0,44 \cdot H_r \cdot \sqrt{N_k};$$

$\nu_{пвс}$ – кинематическая вязкость паровоздушной смеси (ПВС), м²/с:

$$\nu_{пвс} = \frac{T_n^{1,102} \cdot 10^{-6}}{C_{ср}^{0,0499} \cdot M^{1,055}}; \quad (13)$$

T_n – начальная температура процесса, К;

$C_{ср}$ – средняя концентрация углеводородов в газовом пространстве резервуара, в долях;

M – молярная масса паров нефти, кг/кмоль:

$$M = 0,0043 \cdot (T_{нк} - 61)^{1,7}; \quad (14)$$

$T_{нк}$ – температура начала кипения нефти, К;

Gr – число Грасгофа:

$$Gr = g \cdot H_r^3 \cdot \nu_{пвс}^{-2} \cdot \beta_T \cdot |T_r - T_b|; \quad (15)$$

β_r – коэффициент объемного расширения ПВС;

$\tau_{пр}$ – продолжительность простоя резервуара при закрытых дыхательных клапанах;

P_i, P – соответственно среднее парциальное давление воздуха и абсолютное давление в газовом пространстве, Па.

Формула (7) справедлива при изменении параметров в следующих пределах: $Re_{от} = (2,74...15,94) \cdot 10^5$, $Sc = 1,09...1,47$, $d_3/D_p = 0,02...0,12$, $C = 0,27...0,48$. Для формулы (8) эти пределы несколько иные: $Re_3 = 106...443$, $Sc = 0,93...1,39$, $C = 0,27...0,48$, $Gr = (0,08...6,96) \cdot 10^{12}$.

Данные о погрешностях расчета по формулам (7), (8) в работе [5] отсутствуют. Вообще школой профессора Ф.Ф.Абузовой принято указывать не погрешность полученных критериальных уравнений массоотдачи, а коэффициент корреляции между расчетными и экспериментальными величинами. В работе указывается, что коэффициенты множественной корреляции для формулы (7) составляет 0,911, а для формулы (8) – 0,828. Однако коэффициент корреляции характеризует только тесноту связи между расчетными и экспериментальными величинами, но не более. Для инженерных же расчетов необходимо знать не тесноту корреляционной связи чисел Шервуда с определяющими параметрами, а величину погрешности с которой вычисляются коэффициенты массоотдачи β_3 и $\beta_{от}$.

Выполненная нами проверка погрешности расчета коэффициентов массоотдачи от поверхности нефти по формулам Ф.Ф. Абузовой и её учеников на их же экспериментальных данных показала, что она составляет 63,9 % при опорожнении и 121,4 % при заполнении резервуаров.

На основании обработки промышленных экспериментов, проведенных в средней полосе России на резервуарах типа РВС 20000 с усть-балыкской нефтью и типа РВС 5000 с бензином А-66, в работе [6] получено критериальное уравнение массоотдачи при неподвижном хранении:

$$Sh_{пр} = 0,63 \cdot 10^{-3} \cdot Sc^{-1,013} \cdot (1 + Gr)^{0,284} \cdot \left(\frac{H_r}{D_p} \right)^{0,838} \cdot (1 - C)^{-6,74}, \quad (16)$$

где $Sh_{пр}$ – число Шервуда при простое;

Формула (16) справедлива при следующих условиях: $Sc = 0,907...2,27$; $Gr = 2,02 \cdot 10^{10}...808,5 \cdot 10^{10}$; $H_r/D_p = 0,201...0,508$; $C = 0,088...0,342$. Коэффициент

множественной корреляции для нее составляет 0,86. Сведений об относительной и среднеквадратичной погрешностях вычислений авторы [6] опять не приводят.

Впоследствии вместо формулы (16) одна из соавторов [6] предложила другую [7], справедливую, как она отмечает, только при простое резервуаров с "мертвым остатком":

$$\text{Sh}_{\text{пр}} = 0,747 \cdot \text{Sc}^{2,296} \cdot \text{Gr}^{0,0268} \cdot \text{Fo}^{-0,625} \cdot (1 - C)^{-0,393}, \quad (17)$$

где Fo – число Фурье:

$$\text{Fo} = \frac{D_3^* \cdot \tau_{\text{пр}}}{H_r^2}; \quad (18)$$

$\tau_{\text{пр}}$ – продолжительность простоя резервуара при закрытых дыхательных клапанах.

Формула (17) справедлива в следующих условиях: $\text{Sc} = 0,907 \dots 2,31$; $\text{Gr} = 15,0 \cdot 10^6 \dots 708,8 \cdot 10^6$; $\text{Fo} = 9 \cdot 10^{-3} \dots 16,4 \cdot 10^{-3}$; $C = 0,039 \dots 0,342$. Коэффициент множественной корреляции для нее равен 0,8.

Наши расчёты с использованием экспериментальных данных [7] показали, что средняя относительная погрешность расчета $\text{Sh}_{\text{пр}}^*$ в некоторых случаях достигает 3204 %, а среднеквадратичная погрешность составляет 703 %. Такие большие погрешности вычислений свидетельствуют о том, что авторами работ [6, 7] не была выполнена отбраковка «выскакивающих» точек стандартными методами математической статистики.

К сожалению, уравнения (7), (8) и (17) не свободны от других недостатков. Они не позволяют вести расчеты при малых числах Рейнольдса при заполнении и опорожнении резервуара, а также при времени простоя резервуаров близком к нулю. Критериальное уравнение массоотдачи при простое резервуаров ошибочно получено путем совместной обработки данных по испарению нефтей и бензинов. Учитывая эти недостатки критериальных уравнений (7), (8), (17), а также высокую погрешность расчета по ним актуальным является необходимость получения более точных критериальных уравнений массоотдачи при операциях с нефтями.

Следует подчеркнуть, что при построении критериев подобия массоотдачи существует проблема выбора характерного линейного размера. Оценки показали, что использование для этих целей диаметра резервуара делает невозможным их

перенос на другие емкости. На основе метода анализа размерностей, в работе [8] был предложен новый критерий подобия, не содержащий линейного размера

$$Kt = \frac{J}{\rho_{\text{пвс}} \cdot D_{\text{м}}} \cdot \sqrt{\frac{v_{\text{пвс}}^2 \cdot M_{\text{пвс}} \cdot T}{g \cdot M_{\text{г}} \cdot T_{\text{возд}}}}, \quad (19)$$

где Kt – безразмерный критерий подобия, характеризующий интенсивность испарения нефти;

J – плотность потока массы испаряющейся нефти, кг/(м²·ч);

$\rho_{\text{пвс}}$, $v_{\text{пвс}}$, $M_{\text{пвс}}$ – соответственно, плотность, кинематическая вязкость и молярная масса паровоздушной смеси;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

T – температура нефти, К.

Величина J показывает какое количество нефти или бензина испарится с единицы поверхности в единицу времени.

С помощью метода анализа размерностей было установлено, что в общем случае величина критерия подобия Kt зависит от следующих факторов [9]:

$$Kt = f(\Delta\pi, Sc, Re_{\text{ср}}, Fr \cdot Re), \quad (20)$$

где $\Delta\pi$ – модуль движущей силы процесса испарения, $\Delta\pi = \frac{C_s - C}{1 - C_s}$;

$Re_{\text{ср}}$ – среднее число Рейнольдса, характеризующее скорость омывания поверхности нефти воздухом при опорожнении резервуаров;

$Fr \cdot Re$ – параметр подобия, характеризующий интенсивность перемешивания нефти в резервуаре при заполнении.

Опыт применения Kt - критерия при расчете потерь бензина [8] от испарения показывает, что среднеквадратичная погрешность не превышает 26,5 %. Поэтому авторы рассчитывали, что применение Kt - критерия позволит значительно снизить и погрешность расчета потерь нефти от испарения. Но дополнительно в правую часть формулы (20) была введена относительная плотность нефти $\rho_{\text{отн}}$, т.к. её влияние на величину Kt оказалось значимым.

Для вывода критериальных уравнений массоотдачи при закачке, простое и откачке нефтей были использованы данные по испарению ромашкинской, усть-балыкской и других нефтей за периоды с февраля по ноябрь 1971, 1977 и 1982 гг. из резервуаров типа РВС 5000 и РВС 20000 на перекачивающих станциях маги-

стральных нефтепроводов «Мозырь», «Самотлор», «Чекмагуш», «Парабель» и других.

Вышеуказанные промышленные данные содержат измерения концентрации углеводородов по высоте ГП C_n , концентрации насыщенных паров C_s , температуры нефти T_n и воздуха T_v , высоты взлива нефти $H_{взл}$, плотности нефти при стандартных условиях ρ_{293} , расходы подсасываемого воздуха $Q_{возд}$ и откачиваемой нефти $Q_{от}$ (при опорожнении резервуара), а также расходы вытесняемой ПВС $Q_{пвс}$ и закачиваемой нефти $Q_{зак}$ (при заполнении резервуара) за определенные промежутки времени Δt .

Остальные необходимые величины были определены расчетным путем при заданных начальной концентрации нефти и насыщенных паров, температуре и абсолютном давлении. В ходе расчетов были приняты следующие допущения: $P = P_{атм} = 101325$ Па, $T_n = T_v = T_{гп}$, $H_r = H_{ср}$.

В результате анализа процессов массоотдачи в резервуарах при операциях с нефтями было установлено, что уравнение регрессии для выражения (19) в общем случае имеет вид

$$Y = a \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \cdot \dots \cdot x_n^{b_n}, \quad (21)$$

где Y – функция отклика или зависимая переменная;

$x_1 \dots x_n$ – независимые переменные или предикторы;

a – свободный член;

$b_1 \dots b_n$ – угловые коэффициенты.

Так как функция отклика Kt зависит от нескольких факторов Δt , Sc , $\rho_{отн}$, $Re_{ср}$, $Fr \cdot Re$, то для определения неизвестных эмпирических коэффициентов модели (21) использовался метод множественного регрессионного анализа, для чего выражение (21) предварительно приводилось к линейному виду посредством логарифмирования. Все необходимые статистические расчеты производились с использованием пакета статистических программ Statgraphics Plus 5.1.

Предварительная обработка данных сводилась к двум процедурам:

– проверке соответствия распределения исходных данных закону нормального распределения;

– отсеиванию «выбросов» или резко выделяющихся наблюдений.

Для оценки закона распределения экспериментальных данных использовался комплекс стандартных методов математической статистики, реализованных в вышеупомянутом программном продукте. Для аналитической оценки закона распределения экспериментальных данных проведен прикидочный анализ величин стандартных коэффициентов асимметрии и эксцесса, а также более строгие критерии согласия Колмогорова-Смирнова и Пирсона χ^2 .

Реализация процедуры отсеивания резко выделяющихся наблюдений в используемом программном продукте осуществляется графическими методами. Выбросы или нетипичные, резко выделяющиеся, наблюдения нормально распределенного параметра можно зафиксировать на нормальном вероятностном графике, однако более строго аномальные точки выявляются на диаграммах размаха типа «прямоугольник-отрезок» («ящик с усами»).

После проведения процедуры множественного регрессионного анализа проводилась проверка качества полученной модели с помощью следующих стандартных методов математической статистики:

- проверки значимости коэффициентов регрессии с помощью t - критерия Стьюдента;
- проверки значимости регрессии методом дисперсионного анализа по F - критерию Фишера;
- оценки коэффициента детерминации R^2 ;
- анализа остатков с помощью критерия Дурбина-Ватсона.

Также во избежание мультикорреляции векторов независимых переменных для каждого случая строилась корреляционная матрица с целью выявления высокой степени парной корреляции между отдельными предикторами.

В результате проведенных вычислений получены критериальные уравнения, описывающие динамику испарения нефти при её хранении, опорожнении и заполнении резервуаров:

$$Kt_{\text{пр}} = 3,065 \cdot 10^{-11} \cdot \Delta\pi^{0,303} \cdot Sc^{3,44} \cdot (\rho_{293}/1000 - 0,7)^{-8,42}, \quad (22)$$

$$Kt_{\text{от}} = Kt_{\text{пр}} * (1 + 1,104 \cdot 10^7 \cdot \Delta\pi^{-0,708} \cdot Sc^{2,75} \cdot Re_{\text{ср}}^{-1,33}), \quad (23)$$

$$Kt_{\text{зак}} = Kt_{\text{пр}} * (1 + 2 \cdot 10^6 \cdot \Delta\pi^{-0,45} \cdot Sc^{-2,837} \cdot (\rho_{293}/1000 - 0,7)^{7,249} \cdot (Fr \cdot Re)^{0,188}). \quad (24)$$

Среднеквадратичная погрешность расчета по формулам (22) - (24) составляет соответственно 24,78 %, 12,70 % и 6,41 %.

В отличие от ранее существовавших, данные критериальные уравнения обладают существенно меньшей погрешностью, позволяют прогнозировать динамику испарения нефтей с различными свойствами в резервуарах разной вместимости. Их отличительной особенностью является то, что расчёты ведутся по начальной концентрации углеводородов в газовом пространстве резервуара, что делает возможным отказ от итерационных вычислений.

Литература

1. Абузова Ф.Ф. Исследование потерь нефти и нефтепродуктов и эффективности средств сокращения их в резервуарах: Дис. ... докт. техн. наук. – Уфа, 1977. - 334 с.
2. Филитов А.В. Исследование потерь летучих фракций нефти на примере нефтепромыслов Татарии и объектов управления Северо-Западными магистральными нефтепроводами: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – М., 1971. – 17 с.
3. Хабибуллина С.С., Лебедич С.П. Расчет прироста концентраций при неравномерном распределении углеводородных газов в заполняемом резервуаре / В кн. Проектирование, строительство и эксплуатация газонефтепроводов и нефтебаз: Сб. науч. тр. Уфимс. нефт. ин-та, вып. 25. – Уфа, 1975. – С. 185 - 187.
4. Хабибуллина С.С. Оценка концентрации углеводородных паров в резервуаре при выделении газа из нефти // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. - 1976. - №6. - С. 1-3.
5. Мартяшова В.А. Исследование испарения нефтей и нефтепродуктов из резервуаров в условиях интенсификации технологических процессов: Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 1978. -241 с.
6. Мухамедьярова Р.А., Абузова Ф.Ф. Массоотдача от испаряющейся поверхности при насыщении газового пространства резервуара // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. - 1981. - № 4. - С. 27-29.
7. Молчанова Р.А. Исследования по выбору типов резервуаров для хранения легкоиспаряющихся нефтепродуктов: Дис... канд. техн. наук. – Уфа, 1981. – 168 с.

8. Коршак С.А. Критерий подобия для описания процессов массоотдачи в резервуарах длительного хранения нефти и нефтепродуктов // Транспорт и хранение нефтепродуктов. - 2002.- № 10-11. - С. 27-28.

9. Коршак А.А., Коршак С.А. Выбор критериев подобия для учёта особенностей испарения бензинов при заполнении и опорожнении резервуаров // Изв. ВУЗов. Сер. Нефть и газ. - 2008. - № 1. - С.83-85.