

АДДИТИВНОСТЬ И ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ФРАКЦИОННОЙ РАЗГОНКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Фракционная разгонка нефтепродуктов (ФРН) играет особую роль при контроле их качества и управлении им. Многочисленные литературные данные [1-3] свидетельствуют о связи параметров фракционной разгонки с такими характеристиками нефтепродуктов, как вязкость, температура застывания, температура вспышки и т.д. Важнейшей особенностью разгонки является аддитивность свойств ее продуктов. Зная свойства отдельных компонентов, можно предсказать свойства их смеси, что особенно важно при получении нефтепродуктов компаундированием. Ниже представлен вывод математической модели ФРН и аддитивности свойств продуктов разгонки.

На рис. 1, а показана кривая фракционной разгонки бензина в координатах объемная доля v отгона бензина – температура t ; на рис. 1, б – эта же кривая в координатах v – безразмерный параметр τ . Последний представляет собой выражение

$$\tau = \frac{t_T - t_{н.к}}{t_{к.к} - t_T}$$

где t_T – текущая температура выкипания бензина, °С; $t_{н.к}$, $t_{к.к}$ – температура соответственно начала и конца кипения бензина, °С.

Эти кривые типичны для ФРН. Кривая, приведенная на рис. 1, б, описывается уравнением

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{k v (1-v)}{\tau}$$

где k – характеристика интенсивности ФРН при $\tau=1$.

После интегрирования этого уравнения получаем

$$v = \frac{a \tau^k}{1 + a \tau^k} \quad (1)$$

где a – показатель симметричности кривой ФРН относительно точки с координатой $\tau=1$.

Таким образом, ФРН можно характеризовать четырьмя параметрами: a , k , $t_{н.к}$, и $t_{к.к}$. Для определения их нами предложено несколько методик.

Данные фракционной разгонки, проводимой до последнего возможного отбора продукта, будем называть «полными». Для их обработки применены две методики, включающие уравнение (1). В первой критерием оптимальности параметров является дисперсия (метод наименьших квадратов – МНК); во второй – наименьшая сумма отклонений кривой ФРН, представленной в координатах $\ln v/(1-v) - \ln \tau$, от прямой, проведенной через начальную и конечную точки ФРН (метод наименьших площадей – ПЛ).

При «неполных» данных о ФРН, т.е. при отгоне 60–80% нефтепродукта, для определения ее параметров использовали данные о точке перегиба (ТП) кривой ФРН, представленной в координатах $dv/dt - t$ (ТП).

В нефтепереработке широко распространены технологии, включающие стадии компаундирования и разделения. Во всех случаях необходимо иметь данные о представительных характеристиках и их взаимосвязях. Рассмотрим аддитивные свойства нефтепродуктов при фракционной разгонке.

О. Н. ЖАРКОВА, И. А. ДИМУДУ,
Г. Н. АБАЕВ, А. В. СПИРИДОНОВ

Вывод и анализ уравнений аддитивности параметров ФРН. Основное уравнение аддитивности. Для смеси нефтепродуктов оно имеет вид

$$\rho_{см} (t_{к.к} - t_{н.к})_{см} \left[1 - \int_0^{\infty} \frac{d\tau}{(1 + a_{см} \tau^{k_{см}}) (1 + \tau_{см})^2} \right] = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i (t_{к.к} - t_{н.к})_i \left[1 - \int_0^{\infty} \frac{d\tau}{(1 + a_i \tau^{k_i}) (1 + \tau_i)^2} \right] \quad (2)$$

где $\rho_{см}$, ρ_i – относительная плотность соответственно смеси и ее i -го компонента; v_i – объемная доля i -го компонента в смеси; n – число компонентов.

Для приближенного вычисления интеграла применяли формулу Симпсона. Ниже представлены другие варианты уравнений аддитивности, полученных на основе анализа кривой ФРН, в координатах $v - t$ и $v - \tau$.

Аддитивность площадей трапеций (треугольников), образованных касательной, проведенной через точку А с координатой $\tau=1$ (см. рис. 1, б). Касательная при пересечении с осью $v=0$ образует отрезок τ_0 , с осью $v=1$ –

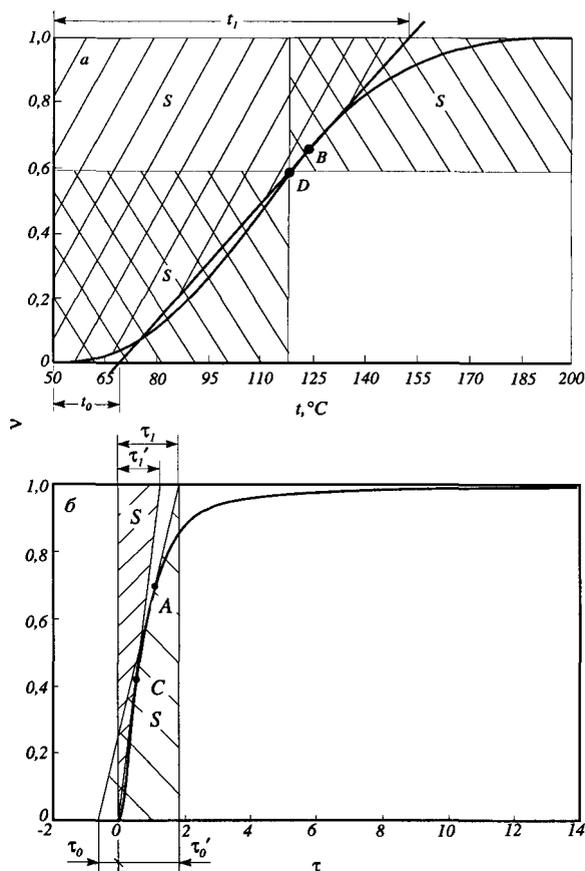


Рис. 1. Кривые фракционной разгонки бензина в координатах $v - t$ (а) и $v - \tau$ (б).

отрезок τ_1 . Площадь S трапеции (треугольника) определяется по формуле

$$S = \frac{1}{2} \left(\frac{|k-a-1|}{k} + \frac{1+a+ak}{ak} \right)$$

Уравнение аддитивности площадей трапеций может быть записано в виде

$$\rho_{см} S_{см} = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i S_i \quad (3)$$

Аддитивность площадей трапеций, образованных касательной, проведенной через точку $\tau=1$ (см. рис. 1, а; точка В). При пересечении касательной с осью $v=0$ образуется отрезок t_0 , при пересечении с осью $v=1$ — отрезок t_1 . Площадь S трапеции определяется по формуле

$$S = \frac{1-a^2}{8ak} (t_{к.к} - t_{н.к}) + \frac{t_{н.к} + t_{к.к}}{2}$$

Уравнение аддитивности имеет вид

$$\rho_{см} S_{см} = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i S_i \quad (4)$$

Аддитивность площадей трапеций, образованных касательной, проведенной через точку $\tau=\tau_{опт}$ (точка С перегиба кривой ФРН, см. рис. 1, б). При пересечении касательной с осью $v=0$ образуется отрезок t_0 , с осью $v=1$ — отрезок t_1 .

Площадь трапеции

$$S = \frac{1}{2} \left[\frac{k-1}{a(k+1)} \right]^{1/k} \frac{(k-1)^2 + (k+1)^2}{k^2 - 1}$$

Условие аддитивности записывается в виде

$$\rho_{см} S_{см} = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i S_i \quad (5)$$

Аддитивность средних доли $v_{ср}$ отгона и температуры $t_{ср}$. На кривой фракционной разгонки, представленной в координатах $v-t$ (см. рис. 1, а), рассмотрим точку D , для которой справедливо условие

$$v_{ср} (t_{ср} - t_{н.к}) = (1 - v_{ср}) (t_{к.к} - t_{ср})$$

Среднюю долю отгона нефтепродукта можно определить по формуле

$$v_{ср} = \frac{1}{1 + (1/a)^{1/(k+1)}}$$

Если найденная таким образом $v_{ср}$ является величиной аддитивной, то условие аддитивности имеет вид

$$\rho_{см} v_{ср, см} = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i v_{ср, i} \quad (6)$$

Среднюю температуру можно определить по формуле

$$t_{ср} = \frac{t_{к.к} (1/a)^{1/(k+1)} + t_{н.к}}{1 + (1/a)^{1/(k+1)}}$$

Таким образом, уравнение аддитивности свойств нефтепродуктов при фракционной разгонке имеет вид

$$(t_{к.к} - t_{ср})_{см} \rho_{см} = \sum_{i=1}^n (t_{к.к} - t_{ср, i}) v_i \rho_i \quad (7)$$

Уравнения аддитивности (2)–(7), составленные относительно различных характерных точек на кривой ФРН, были

проверены по экспериментальным данным для смесевых бензинов, реактивных ТС и дизельных ДТ топлив. Результаты проверки — погрешности расчета по уравнениям аддитивности для трех методов определения параметров фракционной разгонки — приведены в таблице. Как видно, наименьшую погрешность расчета дает уравнение (4), наибольшую — уравнение (5).

Разработка алгоритма определения параметров смеси по параметрам ее компонентов. Алгоритм разрабатывали для дизельного топлива, получаемого на установке АВТ компаундированием трех компонентов: первой масляной фракции, легкого дизельного топлива (ЛДТ) и атмосферного газойля (АГ). Вначале были рассмотрены совместно уравнения аддитивности (2), (4), (6) и (7). Проверка алгоритма показала, что рассчитанные по этим уравнениям значения параметров значительно отличаются от экспериментальных. Поскольку наименьшую погрешность дает уравнение (4), при дальнейшей работе над алгоритмом использовали только это уравнение. Для определения температур начала и конца кипения ДТ искали эмпирические уравнения в виде

$$t = A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 + \dots + A_n x_n$$

где A_0, \dots, A_n — коэффициенты регрессии; x_i — параметр ФРН.

Проанализировав возможные зависимости температур начала и конца кипения ДТ от параметров его компонентов, выяснили, что температура начала кипения ДТ связана с

Метод определения параметров	Погрешность (%) расчета по уравнению аддитивности					
	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
<i>Бензин обр.1</i>						
МНК	+16,77	-0,65	+0,64	+34,32	-13,86	+19,87
ПЛ	+12,12	+1,61	+1,11	+31,95	-13,51	+17,24
ТП	+7,60	-72,87	+9,32	+26,77	-11,61	+11,18
<i>обр.2</i>						
МНК	+20,82	-24,29	-2,01	+19,21	-3,15	+20,76
ПЛ	+19,84	-17,94	-2,34	+13,97	-1,71	+21,31
ТП	+3,54	-5,87	-3,67	+29,75	-5,29	+8,21
<i>Реактивное топливо ТС обр.1</i>						
МНК	-1,12	-2,40	-0,08	+24,81	-9,02	+2,04
ПЛ	+3,18	-4,97	-0,07	+26,97	-9,34	+2,17
ТП	+1,83	-25,00	-0,47	+20,22	-4,63	+2,88
<i>обр.2</i>						
МНК	+2,67	+2,38	+0,54	+10,39	-5,56	+6,03
ПЛ	+2,30	-7,04	+0,33	+7,68	-5,56	+5,43
ТП	+2,22	-9,61	+0,87	+15,76	-4,60	+8,85
<i>Дизельное топливо ДТ обр.1</i>						
МНК	-3,46	-2,82	+2,65	+11,33	-3,90	-3,00
ПЛ	+2,80	-0,47	+2,27	+7,28	-2,60	+2,96
ТП	-0,53	-35,06	+2,08	+2,47	-0,80	+0,55
<i>обр.2</i>						
МНК	+18,41	-13,03	+1,64	+33,37	-13,47	+21,62
ПЛ	+19,14	-17,06	+1,40	+32,61	-12,13	+22,22
ТП	-0,81	+9,06	+1,01	+22,18	-10,90	+5,74

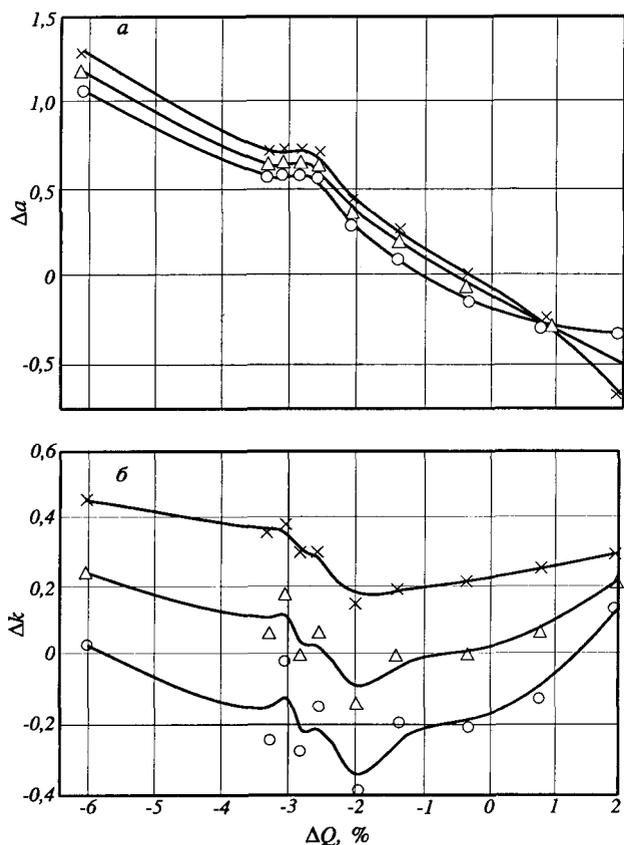


Рис. 2. Зависимость разностей Δa (а) и Δk (б) между исходными и расчетными значениями параметров a и k от погрешности ΔQ расчета по уравнению (4) аддитивности трапезий: x, Δ, \circ - данные расчета по алгоритму соответственно 1, 2 и 3.

температурой начала кипения легкого компонента смеси - ЛДТ, его долей в смеси и параметром a .

Исходя из наименьшей дисперсии различных вариантов влияния параметров ЛДТ на температуру начала кипения топлива ДТ, получили уравнение

$$t_{\text{н.к.ад}}^{\text{ДТ}}/t_{\text{н.к.ад}}^{\text{ДТ}} = A_0 + A_1 t_{\text{н.к.}}^{\text{ЛДТ}} + A_2 v^{\text{ЛДТ}} + A_3 a^{\text{ЛДТ}} + A_4 t_{\text{н.к.}}^{\text{ЛДТ}} v^{\text{ЛДТ}} \quad (8)$$

где $t_{\text{н.к.ад}}^{\text{ДТ}}$ - температура начала кипения ДТ, рассчитанная по линейной аддитивности, °С.

Аналогично было рассмотрено уравнение для определения температуры конца кипения ДТ. Выяснено, что она связана с температурой конца кипения тяжелого компонента - АГ, зависит от его доли в смеси и от параметра a .

Исходя из наименьшей дисперсии различных вариантов влияния параметров АГ на температуру конца кипения ДТ, получили уравнение

$$t_{\text{к.к.ад}}^{\text{ДТ}}/t_{\text{к.к.ад}}^{\text{ДТ}} = A_0 + A_1 (t_{\text{к.к.}}^{\text{АГ}}/t_{\text{к.к.ад}}^{\text{ДТ}}) + A_2 v^{\text{АГ}} + A_3 a^{\text{АГ}} + A_4 (t_{\text{к.к.}}^{\text{АГ}}/t_{\text{к.к.ад}}^{\text{ДТ}}) v^{\text{АГ}} \quad (9)$$

где $t_{\text{к.к.ад}}^{\text{ДТ}}$ - температура конца кипения ДТ, рассчитанная по линейной аддитивности, °С.

Уравнения (8) и (9) проверяли на 12 смесевых ДТ. Получено удовлетворительное соответствие исходных и расчетных температур. Среднее расхождение по температуре начала кипения составило 2,75%, по температуре конца кипения - 3,75%.

Для определения параметров a и k были предложены две методики. В первой применен метод наименьших квадратов для вывода формулы

$$\sum_{j=1}^m \ln [v_j/(1-v_j)] = k \sum_{j=1}^m \ln \tau_j + \ln a \cdot m \quad (10)$$

где m - число разбиений интервала выкипания смеси (в наших расчетах равно 5).

Во второй методике использованы уравнение

$$\ln [v_{\text{ср}}/(1-v_{\text{ср}})] = k \ln \tau_{\text{ср}} + \ln a \quad (11)$$

и уравнение аддитивности (4).

Таким образом, предложено два алгоритма определения параметров смеси на основе известных параметров ее компонентов. Первый включает уравнения (8)-(10); второй - уравнения (4), (8), (9) и (11).

Данные об отклонении расчетных значений температур от исходных представлены выше, зависимость разности между исходными и расчетными значениями параметров a и k от погрешности расчета по уравнению (4) - на рис. 2, а и б соответственно. Данные этих рисунков ранжированы методом скользящей средней. Они свидетельствуют, что наилучшее соответствие расчетных и исходных параметров a и k можно получить, используя средние значения этих параметров между рассчитанными по алгоритмам 1 и 2 (алгоритм 3).

Наименьшее расхождение в этом случае получается при минимальной погрешности расчета по уравнению (4). Средние расхождения расчетных параметров a и k с исходными в трех опытах при наименьшей погрешности расчета по уравнению (4) соответственно -1,14, -0,86 и 0,96% следующие:

$$\Delta a_1 = 0,17, \Delta k_1 = 0,22; \Delta a_2 = 0,15, \Delta k_2 = 0,37; \Delta a_3 = 0,13, \Delta k_3 = 0,23$$

(индексы 1, 2, 3 относятся к алгоритму соответственно 1, 2 и 3).

Расхождение между расчетными и исходными значениями параметров a и k зависит от точности определения температур начала и конца кипения компонентов, которая, в свою очередь, определяется рядом характерных для ФРН факторов: запаздыванием в системе измерения температуры, обусловленным явлением тепловой инерции [4]; потерями легких компонентов; содержанием части продукта в паре; возможностью термического разложения ДТ в конце разгонки. Все это не позволяет требовать более высокой точности определения параметров a и k , чем 0,2-0,3.

Таким образом, рассмотрены возможные условия аддитивности при ФРН и предложен алгоритм определения параметров фракционной разгонки ДТ на основе параметров фракционной разгонки его компонентов. Алгоритм позволяет решать задачи: компаундирования нефтепродуктов; определения фракционного состава смесового сырья по данным о фракционном составе его компонентов; определения фракционного состава одного из компонентов по данным о фракционном составе смесового сырья и других его компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. КОПЫСИЦКИЙ Т. И., РАСУЛОВ С. Р., СУХАРЕВ В. П. - Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность. Обзорная информация, 1992, вып. 1, с. 25-33.
2. КОПЫСИЦКИЙ Т. И., РАСУЛОВ С. Р., СЕРГЕЕНКО-ВА Е. В. - Азербайджанское нефтяное хозяйство, 1982, № 1, с. 52-57, 62.
3. Справочник современных автоматизированных систем управления технологическими процессами. - Нефть, газ и нефтехимия за рубежом, 1988, № 3, с. 113-114.
4. КОНДРАТЬЕВ Г. М. Тепловые измерения. М., Машгиз, 1957. - 244 с.

Полоцкий государственный университет