А. Р. Гайсина (к.т.н., доц.), К. Е. Станкевич (к.т.н., доц.), А. В. Ганцев (к.т.н., доц.),
Л. Ф. Байгускарова (магистрант), А. С. Вахитова (магистрант)

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ВЯЗКОСТИ ТОПОЧНОГО МАЗУТА

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
кафедра технологии нефти и газа
450062, Уфа, ул. Космонавтов, 1; тел. (347)2428931, e-mail: Liliya-1000@mail.ru

A. R. Gaisina, K. E. Stankevich, A. V. Gantsev, L. F. Baiguskarova, A. S. Vakhitova

MODEL OF CALCULATION OF FURNACE FUEL OIL VISCOSITY

Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., 450062, Ufa, Russia; ph. (347)2428931, e-mail: Liliya-1000@mail.ru

Вязкость является одним из важнейших показателей качества мазутов, поэтому она положена в основу их маркировки. Определение и прогнозирование вязкости мазута, полученного смешением различных фракций, является актуальной задачей. В ходе данной работы разработана математическая модель для расчета вязкости топочного мазута марки М100, получаемого компаундированием базового вязкого компонента – гудрона, с тремя маловязкими разбавителями: легким вакуумным газойлем, легким каталитическим газойлем и прямогонной фракцией дизельного топлива. Полученная математическая модель была проверена экспериментально.

Ключевые слова: вязкость; гудрон; дизельная фракция; компаундирование; котельное топливо; легкий вакуумный газойль; легкий каталитический газойль; математическая модель; смешение, топочный мазут.

В прошлом веке мазут использовался как основное технологическое топливо, поэтому данный вид топлива был единственным и незаменимым. В настоящее время происходит интенсивная газификация котельных установок, и большая часть мазута отправляется на переработку.

В нашей стране мазут остается наиболее массовым нефтепродуктом. Он используется как топливо для паровых котлов, промышленных печей и котельных установок и применяется в двигателях морских судов и тепловозов. Пик потребления мазута выпадает на зимний сезон¹.

Производство различных видов мазута требует определенных рецептур приготовления, которые позволяют обеспечить соответствие потребительских и экологических требований².

Согласно ГОСТ 10585-2013 «Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия» в зави-

Дата поступления 20.03.18

Viscosity is one of the most important quality indicators of fuel oils, so it is the basis for their marking. The determination and prediction of fuel oil viscosity, obtained by mixing various fractions, is a topical problem at present. In the course of this work, a mathematical model has been developed for calculating the viscosity of M100 fuel oil, obtained by compounding the base viscous component: tar with three low-viscosity diluents: light vacuum gas oil, light catalytic gas oil, and a straight-run fraction of diesel fuel. The obtained mathematical model was tested experimentally.

Key words: blending; boiler oil; diesel fraction; furnace fuel oil; light catalytic gas oil; light vacuum gas oil; mathematical model; mixing; tar; viscosity.

симости от назначения установлены следующие марки мазута:

- флотский Ф5;
- топочный 40;
- топочный 100.

Существует несколько проблем при приготовлении качественного мазута:

- 1) длительность анализов компонентов, входящих в состав конечного продукта (6–8 ч);
- 2) при расчете рецептур компаундирования не учитывается неаддитивность показателей качества;
- 3) длительность перевода потоков из одного резервуара в другой (до 30 мин). Вследствие этого – простаивание железнодорожного транспорта;
- 4) обнаружение потребителями несоответствия требованиям стандартов из-за «старения» мазута.

В работе рассмотрены рецептуры приготовления топочного мазута М100, который получают на нефтеперерабатывающем заводе смешением из компонентов, вырабатывающихся на различных установках.

Основными компонентами для приготовления топочного мазута марки 100 являются тяжелые остатки первичной и вторичной переработки нефтяного сырья:

- гудрон с установки АВТ (атмосферно-вакуумная трубчатка);
- гудрон с установки висбрекинга ^{3,4}.

В целях обеспечения соответствия качества мазута требованиям ГОСТ по содержанию серы и вязкости в качестве разбавителей в мазут могут вовлекаться маловязкие компоненты ⁵:

- фракция дизельного топлива прямогонная;
- вакуумный газойль с установки АВТ;
- дистиллят дизельный гидроочищенный с установок гидроочистки дизельного топлива;
- легкий газойль (фр. 192–325 °С) с комбинированной установки каталитического крекинга;
- тяжелый газойль (фр. 325–420 °С) с комбинированной установки каталитического крекинга;
- нефтешламы ⁶.

Основными показателями качества мазута являются условная и кинематическая вязкости, плотность, содержание серы и сероводорода, температура вспышки и застывания, содержание механических примесей, зольность, коксуюемость ⁷.

Вязкость является важнейшим показателем качества топочного мазута, определяющим полноту сгорания и распыление котельного топлива в условиях горения, условиях сливно-наливных операций, а также схему топливных систем потребителей.

Проанализировав имеющиеся схемы компаундирования и сам процесс смешения, изучив методы определения показателей качества, характеризующие для товарного мазута и его компонентов, предлагается разработать модель, которая позволит рассчитать компонентный состав котельного топлива с учетом показателей качества имеющихся компонентов.

Материалы и методы исследования

Существует несколько формул для расчета вязкости мазута, состоящего из двух компонентов: гудрона — базового компонента, и разбавителя ^{7–9}.

В данной работе предложена модель, включающая две формулы, предназначенная для расчета вязкости мазута, компонентами которого являются гудрон и три разбавителя.

Для разработки математической модели расчета вязкости топочного мазута было исследовано более 100 проб базового компонента (гудрона) и трех разбавителей.

В качестве базового компонента использовали вакуумный остаток (Г) с установки «Висбрекинг гудрона», а в качестве разбавителей — следующие фракции:

- вакуумный газойль легкий (ЛВГ) с установки АВТ;
- прямогонная дизельная фракция (Д/т) с установки АВТ;
- легкий каталитический газойль (ЛКГ) с комбинированной установки каталитического крекинга.

Вязкость гудрона определяли по ГОСТ 11503-74 с помощью прибора для определения вязкости битума при 80 °С, выражаемой в секундах (обозначим ВУБ80). Для того, чтобы рассчитать необходимое соотношение основного компонента в смеси, условную вязкость гудрона пересчитали в кинематическую при 100 °С по следующей формуле ¹⁰:

$$\nu_{100} = 120 + 4.7424 \cdot \text{ВУБ80}. \quad (1)$$

Вязкости разбавителей в лабораторных условиях так же, как и вязкость товарного мазута, определяли по ГОСТ 6258-85 в вискозиметре типа ВУ при 100 °С. Но для расчета оптимального соотношения компонентов в товарном мазуте, условные вязкости необходимо перевести в кинематические вязкости при 100 °С.

Для перевода условной вязкости разбавителей, воспользовались приложением к ГОСТ 33-82, в котором приведены таблица и формула для перевода кинематической вязкости в условную при температуре испытания.

При составлении математической модели использовали экспериментально-статистический метод регрессионного анализа ¹¹:

- на основании известных экспериментальных данных вязкости разбавителей выбрали регрессионное уравнение:

$$\nu_{\text{разб}} = \alpha_1 \cdot \omega_{\text{Д/т}} + \alpha_2 \cdot \omega_{\text{ЛКГ}} + \alpha_3 \cdot \omega_{\text{ЛВГ}}, \quad (2)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — коэффициенты математической модели;

$\omega_{\text{Д/т}}, \omega_{\text{ЛКГ}}, \omega_{\text{ЛВГ}}$ — содержание в массовых долях соответственно прямогонной дизельной фракции, легкого каталитического газойля, легкого вакуумного газойля в котельном топливе.

- имея массив экспериментальных значений вязкости и ω_i осуществляли подбор значений коэффициентов регрессии.

В данной работе подбор коэффициентов для математической модели осуществили следующим образом: для устранения заведомо неверных решений подбирали пределы вязкости для каждого разбавителя: для прямогонной дизельной фракции 1.0–5.1 мм²/с, легкого каталитического газойля 2.0 мм²/с, легкого вакуумного газойля 4.1–6.2 мм²/с.

Математическая модель для расчета вязкости разбавителей:

$$v_{разб} = 3.2 \cdot \omega_{д/т} + 2.0 \cdot \omega_{ЛКГ} + 5.2 \cdot \omega_{ЛВГ} \quad (3)$$

Конечная модель для расчета вязкости представляет наиболее распространенное уравнение для расчета вязкости смеси:

$$\ln(\ln(v_{см} + 0.8)) = x_G \cdot \ln(\ln(v_G + 0.8)) + x_{разб} \cdot \ln(\ln(v_{разб} + 0.8)), \quad (4)$$

где $v_G, v_{разб}$ — вязкости гудрона и разбавителей;
 x_G — массовая доля гудрона;
 $x_{разб}$ — суммарная массовая доля разбавителей.

Для проверки полученной модели провели два эксперимента с интервалом в один месяц. Определили следующие показатели: вязкость условную при 100 °С для разбавителей, для базового компонента вязкость условную при 80 °С, содержание фракций до 350 °С, содержание серы и температуру вспышки в открытом тигле.

Качественные показатели компонентов мазута представлены в табл. 2.

Топочный мазут был приготовлен по нескольким рецептурам тщательным смешением всех его компонентов при их одинаковой температуре в течение 4–5 мин.

Для каждой смеси определяли условную вязкость при 100 °С и сравнили ее значение с расчетным. Результаты расчетов и анализов представлены в табл. 3.

Таблица 2

Качество компонентов топочного мазута

Показатели качества	Базовый компонент – гудрон	Разбавители		
		Легкий вакуумный газойль	Прямогонная дизельная фракция	Легкий каталитический газойль
Эксперимент № 1				
Вязкость условная при 100 °С, ВУ	648*	1.4	1.2	1.1
Содержание серы, %	3.22	2.16	1.68	0.65
Температура вспышки в открытом тигле, °С	274	208	144	96
Содержание фракции до 350 °С, %	0	5	72	100
Эксперимент № 2				
Вязкость условная при 100 °С, ВУ	523*	1,4	1.2	1.1
Содержание серы, %	3.31	2.18	1.71	0.74
Температура вспышки в открытом тигле, °С	272	198	150	102
Содержание фракции до 350 °С, %	0	5	73	100

* — вязкость условная при 80 °С, с

Таблица 3

Компонентный состав топочного мазута марки М100

Наименование компонента	Содержание компонентов, %						
	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №3	Смесь №4	Смесь №5	Смесь №6	Смесь №7
Базовый компонент – гудрон	65	65	65	70	70	70	70
Разбавители:							
ЛВГ	10	15	10	10	-	15	15
Д/т	15	10	10	10	15	15	-
ЛКГ	10	10	15	10	15	-	15
Эксперимент № 1:							
Вязкость эксп. при 100 °С, ВУ	4.05	4.41	3.85	5.51	4.03	6.71	5.73
Вязкость расч. при 100 °С, ВУ	4.01	4.36	3.80	5.45	3.98	6.65	5.67
Температура вспышки, °С	130	134	120	144	140	146	138
Зольность, %	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.12	0.11
Эксперимент № 2:							
Вязкость эксп. при 100 °С, ВУ	3.85	4.16	3.64	5.15	3.80	6.24	5.32
Вязкость расч. при 100 °С, ВУ	3.78	4.11	3.58	5.09	3.74	6.19	5.30
Температура вспышки, °С	128	136	124	150	142	144	146
Зольность, %	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.12

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлен график проверки адекватности расчетных данных экспериментальным данным.

Рис. 1. Адекватность расчетных данных (эксперимент №1)

Средняя погрешность формулы (3) составляет 1.16 %, адекватность расчетных данных — 0.99998. При проверке адекватности эксперимента №2 получили такой же коэффициент корреляции, и идентичный график, который здесь не приводится.

Таким образом, предлагаемая формула для расчета вязкости топочного мазута характеризуется высокой адекватностью, простотой массовых расчетов и позволяет обойтись без лабораторных методов определения, что облегчает работу и сокращает время анализа.

Полученную математическую модель можно использовать на производстве для прогнозирования вязкостных свойств топочного мазута, получаемого компаундированием гудрона и трех разбавителей. Проведенные исследования позволяют определить точное количество разбавителей, необходимых для получения качественного топочного мазута.

Литература

1. Долматов Л.В., Удалова Е.А. Товароведение нефтяных продуктов. Т. 6. Специальные органические топлива.— СПб.: Недра, 2014.— 672 с.
2. Ахметов С.А., Гайсина А.Р. Моделирование и инженерные расчеты физико-химических свойств углеводородных систем.— СПб.: Недра, 2010.— 128 с.
3. Валявин Г.Г., Сухоруков А.М., Прокопюк С.Г., Таушев В.В. Висбрекинг гудрона с получением котельного топлива // Химия и технология топлив и масел.— 1999.— №2.— С.25-27.
4. Бойко Е.В. Химия нефти и топлив.— Ульяновск: УлГТУ, 2007.— 60 с.
5. Батыжев Э.А. Особенности термодеструкции нефтяных остатков при получении стабильного топочного мазута // Химия и технология топлив и масел.— 2005.— №4.— С.16-18.
6. Купцов А.В., Магид А.Б. Нефешламы НПЗ — компонент котельного топлива // Нефтепереработка и нефтехимия.— 2006.— №4.— С.12-14.
7. Рудин М.Г., Радченко Е.Д. Краткий справочник нефтепереработчика.— Л.: Химия, 1986.— 328 с.
8. Кокина А.А., Будник В.А., Морозов А.Н., Ситдикова А.В. Изучение вязкостных характеристик компаундирования гудрона с нефтяными разбавителями // Нефтепереработка и нефтехимия.— 2005.— №5.— С.21-23.
9. Лисыцин Н.В., Старцев Б.В., Кузичкин И.В. Оптимальное компаундирование котельных топлив // Нефтепереработка и нефтехимия.— 2003.— №5.— С.10-13.
10. Подиков Ю.М., Мостовой Н.В., Едигарова В.С. Расчет вязкости топочного мазута в моделях оптимального планирования // Химия и технология топлив и масел.— 2008.— №2.— С.44-46.
11. Ахметов А.Ф., Гайсина А.Р., Ганцев А.В. Определение октановых чисел смешения различных классов углеводородов в бензинах каталитического риформинга // Нефтегазовое дело.— 2011.— Т.9, №4.— С.80-82.

References

1. Dolmatov L.V., Udalova E.A. *Tovarovedenie neftianykh produktov. T. 6. Spetsial'nye organicheskie topliva* [Commodity research of oil products. V. 6. Special organic fuel]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2014, 672 p.
2. Akhmetov S.A., Gaisina A.R. *Modelirovanie i inzhenernye raschety fiziko-khimicheskikh svoistv uglevodorodnykh sistem* [Modeling and engineering calculations of physical and chemical properties of hydrocarbon systems]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2010, 128 p.
3. Valiavin G.G., Sukhorukov A.M., Prokopiuk S.G., Taushev V.V. *Visbreking gudrona s polucheniem kotel'nogo topliva* [Visbreaking a tar with receiving of boiler oil]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel* [Chemistry and technology of fuels and oils], 1999, no.2, pp.25-27.
4. Boiko E.V. *Khimiya nefiti i topliv* [Chemistry of oil and fuels]. Ulyanovsk, USTU Publ., 2007, 60 p.
5. Batychev E.A. *Osobennosti termodestruktsii neftianykh ostatkov pri poluchenii stabil'nogo topochnogo mazuta* [Features of Thermodestruction of Crude Residium at Production of Stable Black Oil]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel* [Chemistry and technology of fuels and oils], 2005, no.4, pp.16-18.
6. Kuptsov A.V., Magid A.B. *Nefteshlamy NPZ — komponent kotel'nogo topliva* [Refinery sludge as a component of heavy fuel]. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Refining and Petrochemistry], 2006, no.4, pp. 12-14.
7. Rudin M.G., Radchenko E.D. *Kratkii spravochnik neftepererabotchika* [Quick reference book of the oil refiner]. Leningrad, Khimiya Publ., 1986, 328 p.
8. Kokina A.A., Budnik V.A., Morozov A.N., Sitdikova A.V. *Izuchenie viazkostnykh kharakteristik kompa-undirovaniya gudrona s neftyanyimi razbavitelyami* [Viscosity characteristics analysis of mixture of topped

- residue and oil diluents]. *Neftepererabotka i neftekhi-miya* [Refining and Petrochemistry], 2005, no.5, pp. 21-23.
9. Lisytsin N.V., Startsev B.V., Kuzichkin I.V. *Optimal'noe kompaundirovanie kotel'nykh topliv* [Optimal compounding of boiler fuels]. *Neftepererabotka i neftekhi-miya* [Refining and Petrochemistry], 2003, no.5, pp.10-13.
 10. Tsodikov Yu.M., Mostovoi N.V., Edigarova V.S. *Raschet viazkosti topchnogo mazuta v modeliakh optimal'nogo planirovaniya* [Calculating the viscosity of furnace heavy fuel oil in optimum planning models]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel* [Chemistry and technology of fuels and oils], 2008, no.2, pp.44-46.
 11. Akhmetov A.F., Gaisina A.R., Gantsev A.V. *Opredelenie oktanovykh chisel smesheniia razlichnykh klassov uglevodorodov v benzinakh kataliticheskogo riforminga* [The definition of octane number confusion of different classes of hydrocarbons in the gasoline catalytic reforming]. *Neftegazovoe delo* [Oil and gas business], 2011, vol.9, no.4, pp.80-82.