

**Демидченко Егор Александрович**,  
инженер-программист, цех КИПиА, АО «АНХК»,  
e-mail: demidchenko.ea@yandex.ru

**Стадник Александр Владимирович**,  
инженер-лаборант 1 кат., ИЦ-УКК, АО «АНХК»,  
e-mail: stadnikAV@yandex.ru

## **РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА КОМПОНЕНТОВ БАЗОВЫХ МАСЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО АЛГОРИТМА**

**Demidchenko E.A., Stadnik A.V.**

## **CALCULATION OF THE QUALITY INDICATORS OF BASE OIL COMPONENTS USING A SOFTWARE ALGORITHM**

**Аннотация.** Рассмотрено применение разработанного программного алгоритма в задаче расчёта показателей качества компонентов базовых масел. Показано, что применение программных средств позволяет находить эффективные рецепты с высоким индексом вязкости, что увеличивает итоговое качество продукта и снижает вовлечение дорогостоящих присадок.

**Ключевые слова:** алгоритмизация, программирование, математическое моделирование, нефтепродукты, масла, индекс вязкости.

**Abstract.** The application of the developed software algorithm in the problem of calculating the quality indicators of base oil components is considered. It is shown that the use of software tools makes it possible to find effective recipes with a high viscosity index, which increases the final product quality and reduces the involvement of expensive additives.

**Keywords:** algorithmization, programming, mathematical modeling, petroleum products, oils viscosity index.

Моделирование различных процессов с помощью математики помогает экономить технические и людские ресурсы, необходимые для проведения реальных экспериментов, а также выполнения расчетов вручную. Оно также позволяет предсказывать исходы экспериментов, ограничивая диапазон возможных результатов. В связи с этим было решено использовать методы математического моделирования и программирования для симуляции смешивания нефтепродуктов с целью расчета вязкостных характеристик смазочных материалов. Индекс вязкости (ИВ) – важный безразмерный показатель, характеризующий изменение кинематической вязкости нефтепродукта в зависимости от температуры. Чем выше ИВ, тем качественнее продукт, а соответственно и дороже. При производстве смазочных материалов, которые должны иметь высокий ИВ, используют различные вязкостные присадки, которые позволяют снизить зависимость вязкости продукта от температуры. Такие присадки, как правило, импортные и имеют высокую стоимость. При производстве высокоиндексных масел с использованием компонентов базовых масел (КБМ) с низким ИВ приходится вводить больше присадок улучшающих ИВ, что в конечном итоге, делает производство конечной продукции более дорогостоящей.

Индекс вязкости рассчитывается исходя из фактической кинематической вязкости смазочного материала, измеренной при температурах 40 °С и 100 °С по специальной формуле [1].

Расчёт ИВ по методу А осуществляют по формуле (1):

$$\text{ИВ} = \frac{L-U}{L-H} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $L$  – кинематическая вязкость нефтепродукта при температуре 40 °С в мм<sup>2</sup>/с, имеющего ИВ, равный 0, и такую же кинематическую вязкость при температуре 100 °С, как и нефтепродукт, ИВ которого необходимо рассчитать;  $U$  – кинематическая вязкость нефтепродукта при температуре 40 °С в мм<sup>2</sup>/с, ИВ которого необходимо рассчитать;  $H$  – кинематическая вязкость нефтепродукта при температуре 40 °С в мм<sup>2</sup>/с, имеющего ИВ, равный 100, и такую же кинематическую вязкость при температуре 100 °С, как и нефтепродукт, индекс вязкости которого необходимо рассчитать.

Если кинематическая вязкость нефтепродукта при температуре 40 °С находится в диапазоне от 2 до 70 мм<sup>2</sup>/с, то соответствующие значения  $L$  и  $H$  принимают из данных, приведенных в таблице 1 [1]. Если значения в таблице 1 отсутствуют, но находятся в диапазоне таблицы, их рассчитывают методом линейной интерполяции.

Если кинематическая вязкость нефтепродукта при температуре 100 °С более 70 мм<sup>2</sup>/с, то  $L$  и  $H$  рассчитывают по следующим формулам:

$$L = 0.8353Y^2 + 14.67Y - 216, \quad (2)$$

$$H = 0.1684Y^2 + 11.85Y - 97, \quad (3)$$

где  $Y$  – кинематическая вязкость нефтепродукта при температуре 100 °С в мм<sup>2</sup>/с, ИВ которого необходимо рассчитать.

Если кинематическая вязкость нефтепродукта при температуре 100 °С менее 2 мм<sup>2</sup>/с, то  $L$  и  $H$  рассчитывают по следующим формулам:

$$L = Y(1.5215 + 0.7092Y), \quad (4)$$

$$H = Y(1.35017 + 0.59482Y), \quad (5)$$

где  $Y$  – кинематическая вязкость нефтепродукта при температуре 100 °С мм<sup>2</sup>/с, ИВ которого необходимо рассчитать.

Расчёт ИВ по методу Б осуществляют по формуле (6):

$$\text{ИВ} = \frac{(10^n)-1}{0.00715} + 100, \quad (6)$$

где  $n = \frac{\log H - \log U}{\log Y}$ ,  $H$  – кинематическая вязкость в мм<sup>2</sup>/с при температуре 40 °С нефтепродукта, имеющего ИВ, равный 100, и кинематическую вязкость при температуре 100 °С, как и нефтепродукт, ИВ которого необходимо рассчитать;  $U$  – кинематическая вязкость в мм<sup>2</sup>/с при температуре 40 °С нефтепродукта, ИВ

которого необходимо рассчитать;  $\gamma$  – кинематическая вязкость в мм<sup>2</sup>/с при температуре 100 °С нефтепродукта, ИВ которого необходимо рассчитать.

С повышением температуры вязкость всех чистых жидких веществ снижается, это также справедливо для нефтепродуктов. Эту зависимость можно рассчитать по различным формулам [3]:

– Рейнольдса – Филонова:

$$\ln v = a + bT, \quad (7)$$

где  $v$  – кинематическая вязкость жидкости;  $T$  – температура жидкости, К;  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты;

– Вальтера:

$$\log(\log(v + c)) = a + b \log T, \quad (8)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – эмпирические коэффициенты, при определении коэффициентов  $a$  и  $b$ , коэффициент  $c$  принимают равным 0,8;

– Фогеля – Фульчера – Таммана:

$$v = v_{\infty} e^{\frac{b}{T-\theta}}, \quad (9)$$

где  $v_{\infty}$ ,  $b$  и  $\theta$  – эмпирические коэффициенты.

Из приведённых выше уравнений наиболее часто используют уравнение Вальтера (8). Причем коэффициенты  $a$  и  $b$ , определяют по уравнениям (10) и (11):

$$a = \log(\log(v_1 + 0.8)) - b \log T_1, \quad (10)$$

$$b = \frac{\log\left[\frac{\log(v_2+0.8)}{\log(v_1+0.8)}\right]}{\log T_2 - \log T_1}, \quad (11)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  – вязкости кинематические при температурах  $T_1$  и  $T_2$ , К.

Наиболее частой задачей расчёта вязкости является расчёт вязкости смесей нефтепродуктов. Для таких расчётов используются следующие формулы [3]:

– Кендалла – Монроэ:

$$v_{mix}^{1/3} = \sum_{i=1}^n x_i v_i^{1/3}, \quad (12)$$

где  $v_i$ ,  $x_i$  – кинематическая вязкость  $i$ -го компонента смеси;  $x_i$  – кинематическая вязкость и объёмная (массовая) доля  $i$ -го компонента смеси;  $n$  – количество компонентов в смеси;

– Аррениуса, модифицированную с помощью уравнения Вальтера:

$$\log(\log(v_{mix} + c)) = \sum_{i=1}^n x_i \log(\log(v_i + c)), \quad (13)$$

где  $c$  – постоянный коэффициент смешения, зависящий от свойств компонентов.

При расчёте смеси нефтепродуктов, состоящей из двух компонентов, уравнение (14) принимает следующий вид (15):

$$\log(\log(v_{mix} + 0.8)) = \left(1 - \frac{q}{100}\right) \log(\log(v_1 + 0.8)) - \frac{q}{100} \log(\log(v_2 + 0.8)), \quad (14)$$

где  $q$  – содержание высоковязкого продукта в %, а  $v_1 < v_2$ .

Важной характеристикой смазочных масел также является температура застывания, при которой жидкий смазочный материал перестает течь под действием силы тяжести. В условиях применения смазочных материалов при низких температурах могут возникать нарушения в работе топливомасляных систем, оборудования по перекачке масел, связанные с увеличением вязкости продуктов, выпадением из них твердых (высокоплавких) углеводородов с последующим формированием кристаллической сетки, образованием кристаллов воды [2].

Рассчитать температуру застывания можно также по нескольким уравнениям:

– для индивидуального вещества:

$$T_{заст} = \frac{4.254(\ln v_{50})^2 + 48.337 \ln v_{50} - 59.5}{1 + 0.184 \ln v_{50}}, \quad (15)$$

– для смеси:

$$T_{заст.см} = \sum_{i=1}^n q_i T_{заст_i}, \quad (16)$$

где  $q_i$  – массовая доля компонента;  $n$  – количество компонентов в смеси.

При расчёте показателей качества КБМ учитывается и температура вспышки. Данный показатель определяет минимальную температуру горючей жидкости, при которой в условиях специальных испытаний над её поверхностью образуются пары или газы, способные вспыхивать в воздухе от постороннего источника зажигания, устойчивого горения вещества при этом не возникает. Температура вспышки ниже температуры воспламенения. Температура вспышки определяется по приближенной эмпирической формуле [4]:

$$T_{всп} = 0.736 T_{кип}, \quad (17)$$

где  $T_{кип}$  – температура кипения, К.

На основании вышеизложенных формул была разработана программа, интерфейс, которой изображён на рисунке 1. Её работа заключается в выполнении последовательности инструкций, направленных на решение поиска показателей качества КБМ. Алгоритм вычисления предполагает линейную последовательность действий, которые зависят от входных данных, таких как: вязкость компонентов, количество, расположение компонентов в резервуарах и их качества. Программа производит расчёт смешения двух компонентов, а также проверку соответствия полученного качества установленным нормам. Затем, на основании произведенных вычислений происходит выдача списка рецептур высоко индексного компонента. Пример интерфейса разработанной программы приведен на рис. 1.

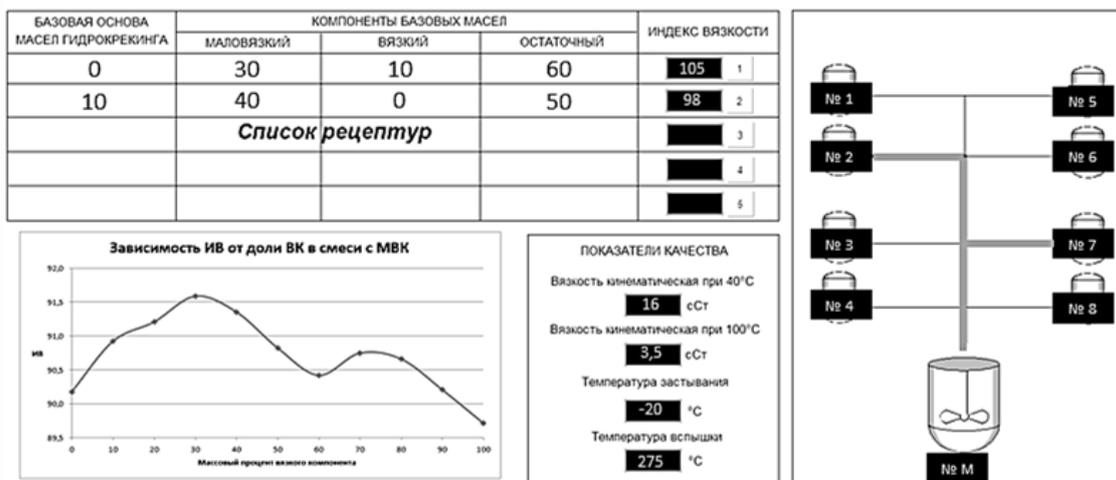


Рисунок 1 – Интерфейс разработанной программы

Для подтверждения правильности работы разработанного программного алгоритма, в лабораторных условиях были приготовлены эталонные смеси, состав которых соответствовал расчетному. При этом, для приготовления смесей из базовой основы масел гидрокрекинга (БОМГ) и основных компонентов (ОК) были использованы компоненты со следующей кинематической вязкостью:

- при 40°C – БОМГ 9,7 мм<sup>2</sup>/с; ОК – 303,0 мм<sup>2</sup>/с;
- при 100°C – БОМГ 2,57 мм<sup>2</sup>/с; ОК – 22,03 мм<sup>2</sup>/с.

Расчётное качество эталонных смесей на основе выбранных компонентов отображено в таблице 1.

Таблица 1

Расчётное качество смесей БОМГ и ОК

Наименование компонентов	Номер смеси										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Содержание компонентов, % мас.										
БОМГ	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
ОК	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Показатели качества	Расчётное качество										
Вязкость кинематическая при 40°C, мм <sup>2</sup> /с	10.0	12.6	16.2	21.2	28.4	39.0	54.9	79.6	119.2	185.1	298.9
Вязкость кинематическая при 100°C, мм <sup>2</sup> /с	2.4	2.8	3.3	4.0	4.8	5.9	7.3	9.3	12.0	15.9	21.5
ИВ	32	42	53	65	81	90	92	91	88	86	86

Экспериментальные (фактические) показатели качества эталонных смесей представлены в таблице 2.

Таблица 2

Фактическое качество смесей БОМГ и ОК

Наименование компонентов	Номер смеси										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Содержание компонентов, % мас.										
БОМГ	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
ОК	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Показатели качества	Фактическое качество										
Вязкость кинематическая при 40°C, мм <sup>2</sup> /с	10.0	12.7	16.6	22.2	31.7	44.6	62.8	91.1	136.5	211.9	298.9
Вязкость кинематическая при 100°C, мм <sup>2</sup> /с	2.4	2.9	3.5	4.3	5.4	6.7	8.3	10.5	13.6	18.0	21.5
ИВ	32	53	82	92	105	101	101	97	95	92	86

При сопоставлении расчётных и фактических показателей качества смесей БОМГ и ОК (рисунок 2) видно незначительное расхождение в значениях. Это говорит о том, что разработанный программный алгоритм позволяет находить эффективную рецептуру смеси с наибольшим ИВ, используя имеющиеся компоненты без дополнительного ввода присадок.

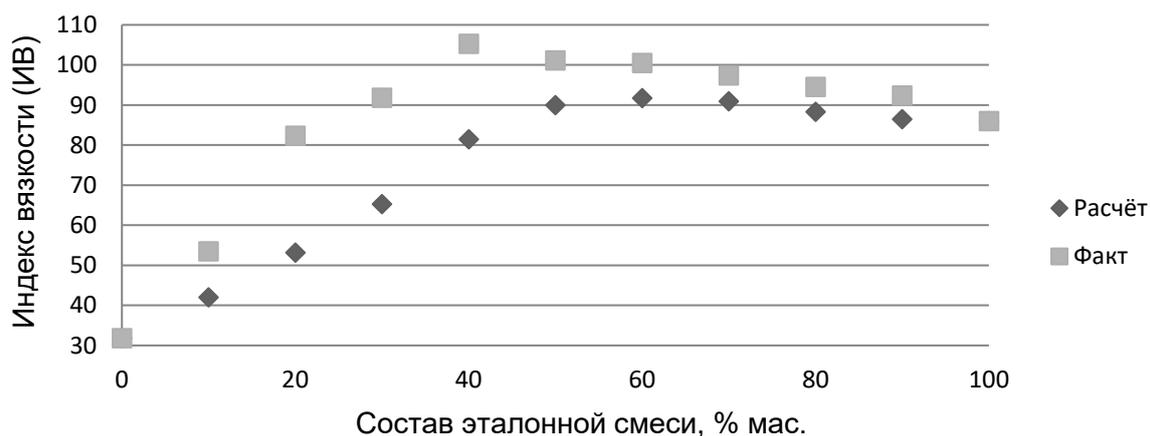


Рисунок 3 – Сопоставление расчётного и фактического качества смесей БОМГ и ОК

Разработанный программный алгоритм успешно рассчитывает показатели качества компонентов базовых масел. Анализ изменения индекса вязкости, рассчитанного алгоритмом, показал соответствие расчётным значениям и подтвердил гипотезу о том, что предложенное соотношение компонентов базовых масел обеспечивает достижение наибольшего индекса вязкости, используя только имеющиеся компоненты без добавления присадок.

Также разработанный программный алгоритм автоматизирует расчет индекса вязкости, ранее выполнявшийся вручную. Это высвобождает время сотрудников лаборатории, позволяя им сосредоточиться на более сложных и требующих экспертной оценки задачах, тем самым повышая общую эффективность работы лаборатории.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 25371-2018. Нефтепродукты. Расчет индекса вязкости по кинематической вязкости. М.: Стандартиформ, 2018.

2. **Капустин В.М., Тонконогов Б.П., Фукс И.Г.** Технология переработки нефти: Учеб. Пособие. В 4-х частях. Часть третья. Производство нефтяных смазочных материалов. – М.: Химия, 2014. – 328 с.

3. **Аралов О.В., Буянов И.В., Саванин А.С., Иорданский Е.И.** Исследование методов расчета кинематической вязкости нефти в магистральном нефтепроводе // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т. 7. № 5. С. 97-105.