

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-6-13-25

УДК 621.892.2

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕРМООКСИДЛИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

METHODS FOR CONTROL OF THERMO-OXIDATIVE STABILITY OF ENGINE OILS

Ковальский Болеслав Иванович,
доктор техн. наук, профессор e-mail: labsm@mail.ru
Kovalsky Boleslav Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor
Рябинин Александр Александрович,
канд. техн. наук, e-mail: aaryabinin@sfu-kras.ru.ru
Ryabinin Alexander Alexandrovich, C. Sc. In Engineering
Сокольников Александр Николаевич,
канд. техн. наук, e-mail: asokolnikov@sfu-kras.ru
Sokolnikov Alexander Nikolaevich, C. Sc. In Engineering,
Афанасов Владимир Ильич,
доцент, e-mail: vafanasov@sfu-kras.ru
Afanasov Vladimir Pyich, associate professor,
Пустовит Павел Юрьевич,
аспирант, e-mail: labsm@mail.ru
Pustovit Pavel Yurievich, postgraduate

Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82/8.
Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 82/8.

Аннотация:

Представлены два метода определения показателей термоокислительной стабильности на примере частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD. Оба метода направлены на расширение информации о качестве исследуемого моторного масла. Первый метод предусматривает определение оптической плотности, испаряемости, коэффициента термоокислительной стабильности, потенциального ресурса, температур начала окисления, испарения, температурных преобразований и критических температур этих процессов. Второй метод усиливает количество тепловой, поглощенной продуктами окисления, испарения и температурных преобразований. Кроме того, он позволяет не только аналитически, как и первый метод, определить их графически за счет линейности зависимостей показателей термоокислительной стабильности от времени и температуры термостатирования исследуемого масла, представленных в логарифмических координатах.

Ключевые слова: оптическая плотность, испаряемость, коэффициент термоокислительной стабильности, температуры начала процессов окисления, испарения, температурных преобразований, критические температуры, потенциальный ресурс, десятичные логарифмы тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления, испарения и температурных преобразований, десятичный логарифм времени термостатирования.

Abstract:

Two methods for determining the indicators of thermo-oxidative stability are presented on the example of a partially synthetic motor oil Lukoil Super 10w – 40 SG / CD. Both methods are aimed at expanding information on the quality of the engine oil under study. The first method provides for the determination of optical density,

volatility, coefficient of thermo-oxidative stability, potential life, oxidation onset and evaporation temperatures, temperature transformations and critical temperatures of these processes. The second method increases the amount of heat absorbed by the products of oxidation, evaporation and temperature transformation. In addition, it allows us to determine the latter not only analytically, like the first method, but also graphically due to the linearity of the dependences of the thermo-oxidative stability indicators on the time and temperature of thermostating of the oil under study, presented in logarithmic coordinates.

Key words: optical density, volatility, coefficient of thermal-oxidative stability, oxidation onset temperatures, temperature transformations, critical temperatures, potential life, decimal logarithms of thermal energy absorbed by the products of oxidation, evaporation and temperature transformations, decimal logarithm of thermostating time.

Введение. Для обоснованного выбора моторных масел и их заменителей, рекомендованных заводами-изготовителями, обычно пользуются справочной литературой [1,2] стандартами [3-7, 14-16] или результатами исследования механизмов окисления и старения [8-11]. Однако рассмотренные методы контроля качества моторных масел не всегда содержат полную информацию о температурной области работоспособности в зависимости от условий и режимов эксплуатации двигателей. Поэтому целью настоящих исследований является разработка методов, повышающих информацию о качестве моторных масел.

Методика исследования. В качестве средств контроля и испытания применялись: прибор для термостатирования масел; фотометр для фотометрирования при толщине фотометрируемого слоя 2мм и электронные весы для измерения массы испарившегося масла при термостатировании. Техническая характеристика приборов представлена в работах [12,13].

Для исследования выбрано всесезонное универсальное частично синтетическое моторное масло Лукойл Супер 10w-40 SG/CD.

Проба масла постоянной массы ($100 \pm 0,1$ г) термостатировалась последовательно при температурах 160, 170, 180°C с перемешиванием механической мешалкой с частотой вращения 300 оборотов/мин. Через равные промежутки времени (8 часов) проба термостатированного масла взвешивалась, определялась масса испарившегося масла, вычислялся коэффициент испаряемости K_g как отношение массы испарившегося масла и массы пробы до испытания, отбиралась часть пробы термостатированного масла для фотометрирования и определения оптической плотности D . По данным оптической плотности и коэффициенту испаряемости вычислялся коэффициент термоокислительной стабильности $P_{тос}$ как их алгебраическая сумма.

Результаты исследования и их обсуждения. На рис. 1 представлены зависимости оптической плотности от времени и четыре типа термостатирования исследуемого частично синтетического моторного масла.

Данные зависимости описываются полиномом второго порядка, а регрессионные уравнения имеют вид для температур:

$$180^\circ\text{C} \quad D = (7.25 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - (1.12 \cdot 10^{-4}) \cdot t + 0.0099 \quad (1)$$

$$170^\circ\text{C} \quad D = (2.46 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - (3.62 \cdot 10^{-4}) \cdot t + 0.0073 \quad (2)$$

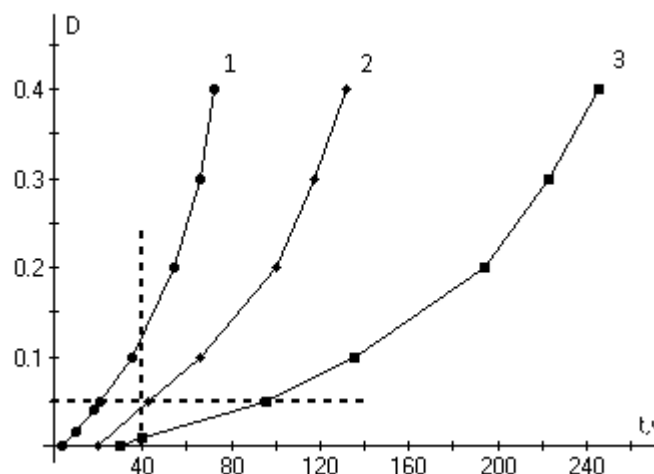


Рис. 1. Зависимости оптической плотности от времени и температуры испытания частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD: 1 – 180°C; 2 – 170°C; 3 – 160°C.
Fig. 1 Dependences of optical density on testing time and temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD: 1 – 180°C; 2 – 170°C; 3 – 160°C.

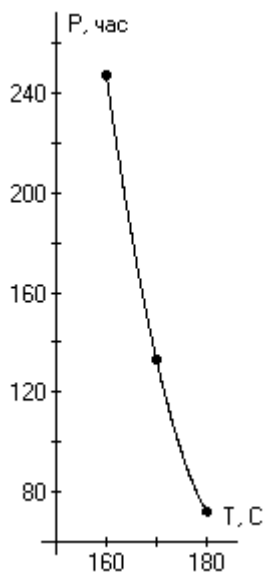


Рис. 2. Зависимость потенциального ресурса частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD от температуры термостатирования при $D = 0.4$

Fig. 2. Dependence of the potential life of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD on the thermostating temperature at $D = 0.4$

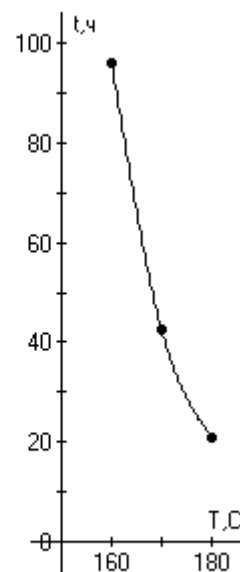
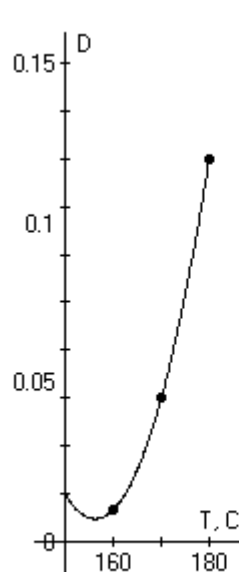


Рис. 3. Зависимости оптической плотности при $t = 40$ часов (а) и времени испытания при $D = 0.05$ (б) от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD

Fig. 3. Dependences of optical density at $t = 40$ hours (a) and test time at $D = 0.05$ (b) on the thermostating temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD

$$160^{\circ}\text{C} \quad D = (8.55 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - (6.16 \cdot 10^{-4}) \cdot t + 0.0189 \quad (3)$$

Коэффициенты корреляции составили: 0.9908; 0.9929; 0.9929.

Средние квадратические отклонения: 0.0140; 0.0129; 0.0128.

Для оценки влияния температуры на процессы окисления предложен потенциальный ресурс P , определяемый временем достижения оптической плотности установленного значения, например, 0,4 (рис. 2).

Регрессионное уравнение зависимости потенциального ресурса от температуры испытания имеет вид:

$$P = 0.265 \cdot T^2 - 98.85 \cdot T + 9279 \quad (4)$$

Коэффициент корреляции: 1.

Среднее квадратическое отклонение: $8.8877 \cdot 10^{-16}$.

Согласно данным предельной температурой работоспособности исследуемого масла является температура 180°C .

Важными эксплуатационными показателями моторных масел являются температура начала процесса окисления и критическая температура.

Для определения температуры начала процессов окисления и критической температуры необходимо на рис. 1 привести вертикально штриховую линию при $t = 40$ часов и определить значения оптической плотности при каждой

температуре, провести горизонтальную штрихованную линию при оптической плотности $D = 0.05$ и определить время достижения этого значения оптической плотности при каждой температуре.

По полученным данным построить графические зависимости оптической плотности от температуры испытания (рис. 3а) и времени испытания при достижении оптической плотности значения $D = 0.05$ при каждой температуре от температуры испытания (рис. 3б). Данные зависимости описываются полиномом второго порядка, а регрессионные уравнения имеют вид:

$$D = 2 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0.0625 \cdot T + 4.89 \quad (5)$$

$$t_d = 0.159 \cdot T^2 - 57.81 \cdot T + 5275.2 \quad (6)$$

Коэффициенты корреляции составили: 1; 1.

Средние квадратические отклонения: $3.0545 \cdot 10^{-19}$; $6.1331 \cdot 10^{-17}$.

При решении уравнения (5) определяется температура начала процессов окисления, которая составила 156.25°C , а при решении уравнения (6) определяется критическая температура для исследуемого масла, которая составила 188.32°C .

Коэффициенты корреляции: 0.9972; 0.9989; 0.9991.

Средние квадратические отклонения: 0.1855; 0.1133; 0.1054.

На рис. 4 представлены зависимости

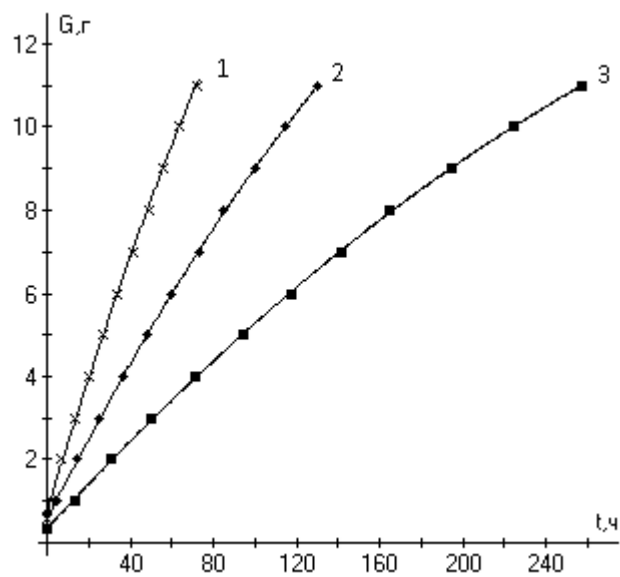


Рис. 4. Зависимости испаряемости от времени и температуры испытания синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD: 1 – 180°C; 2 – 170°C; 3 – 160°C

Fig. 4. Dependences of volatility on testing time and temperature of synthetic motor oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD: 1 – 180°C; 2 – 170°C; 3 – 160°C

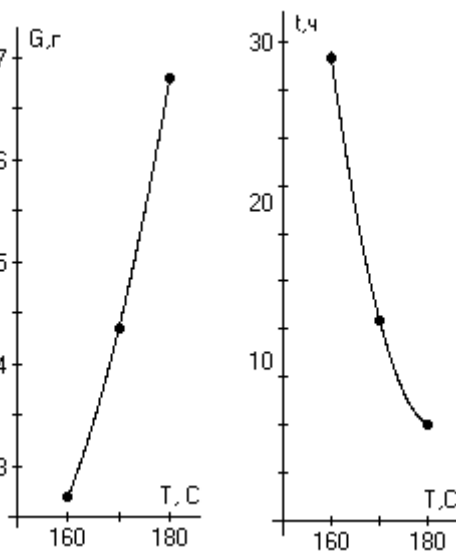


Рис. 5. Зависимости испаряемости при $t = 40$ часов (а) и времени испытания при $G = 2$ грамма (б) от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD

Fig. 5. Dependences of volatility at $t = 40$ hours (a) and test time at $G = 2$ grams (b) on the thermostating temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD

испаряемости от времени и температуры испытания исследуемого масла. Данные зависимости описываются полиномом второго порядка, а регрессионные уравнения имеют вид для температур:

$$180^{\circ}\text{C} \quad G = -(3.085 \cdot 10^{-4}) \cdot t^2 + 0.165 \cdot t + 0.752 \quad (7)$$

$$170^{\circ}\text{C} \quad G = -(1.449 \cdot 10^{-4}) \cdot t^2 + 0.098 \cdot t + 0.582 \quad (8)$$

$$160^{\circ}\text{C} \quad G = -(5.081 \cdot 10^{-4}) \cdot t^2 + 0.054 \cdot t + 0.344 \quad (9)$$

Для определения температуры начала испарения необходимо на зависимостях (рис. 4)

провести вертикальную штриховую линию при $t = 40$ часов и определить значения испаряемости при каждой температуре испытания, а также горизонтальную линию при испаряемости $G = 2$ г. и определить время достижения установленного значения испаряемости для каждой температуры. По полученным данным построить графические зависимости испаряемости от температуры испытания (рис. 5а) и времени достижения установленного значения испаряемости от

температуры испытания (рис.5б). Данные зависимости описываются полиномом второго порядка, а регрессионные уравнения имеют вид:

$$G = 0.004 \cdot T^2 - 1.155 \cdot T + 85.1 \quad (10)$$

$$t_G = 0.049 \cdot T^2 - 17.81 \cdot T + 1624.1 \quad (11)$$

Коэффициенты корреляции составили: 1; 1.

Средние квадратические отклонения: $8.085 \cdot 10^{-18}$; $1.594 \cdot 10^{-17}$.

При решении уравнения (10) определяется температура начала процесса испарения, которая составила 144.38°C ; а при решении уравнения (11)

определяется критическая температура исследуемого масла, которая составила 181.73°C .

На рис. 6 представлены зависимости коэффициента термоокислительной стабильности $P_{\text{тос}}$ от времени и температуры испытания исследуемого масла. Данные зависимости описываются полиномом второго порядка, а регрессионные уравнения имеют вид для температур:

$$180^\circ\text{C} \quad P_{\text{тос}} = (6.807 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 + 0.0019 \cdot t + 0.0073 \quad (12)$$

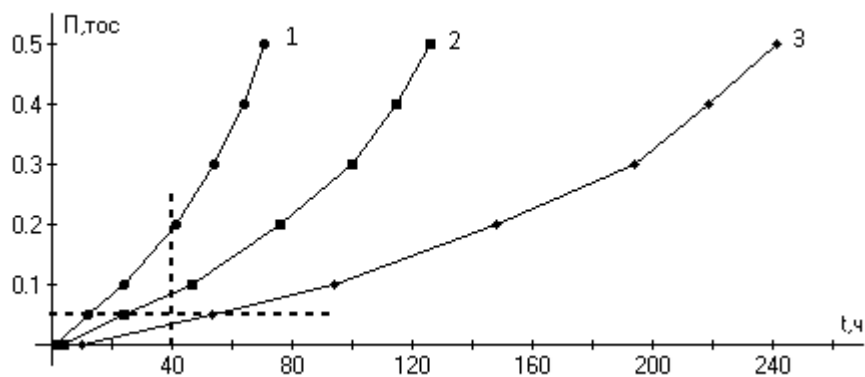


Рис. 6. Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени и температуры испытания частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD: 1 – 180°C ; 2 – 170°C ; 3 – 160°C

Fig. 6. Dependences of the coefficient of thermo-oxidative stability on the testing time and temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w – 40 SG / CD: 1 – 180°C ; 2 – 170°C ; 3 – 160°C

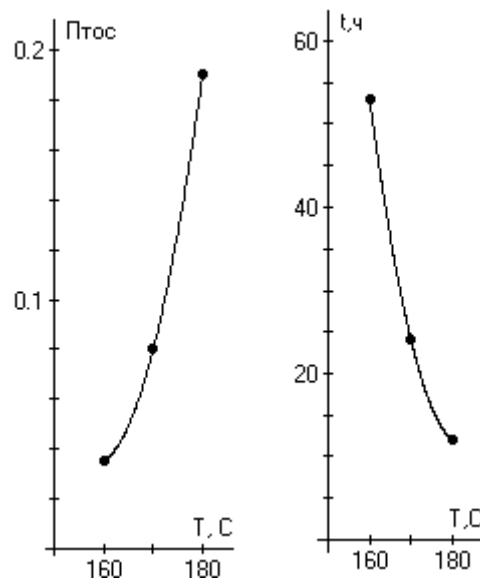


Рис. 7. Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности при $t=40$ часов (а) и времени испытания при $P_{\text{тос}} = 0.05$ (б) от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD

Fig. 7 Dependences of the coefficient of thermo-oxidative stability at $t = 40$ hours (a) and the test time at $P_{\text{тос}} = 0.05$ (b) on the thermostating temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD

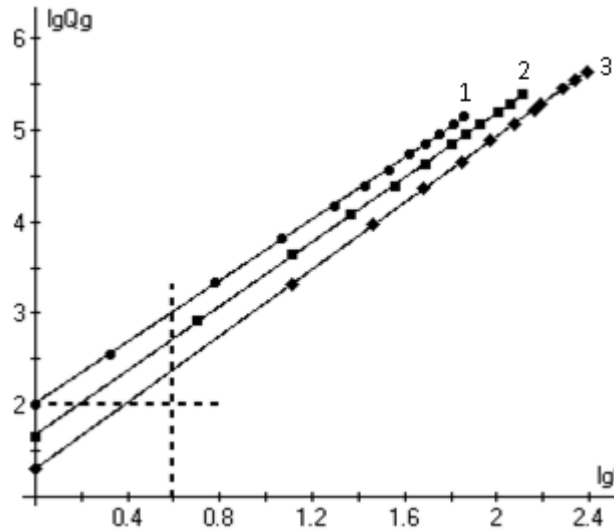


Рис. 8. Зависимости десятичного логарифма тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления от десятичного логарифма времени и температуры термостатирования частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD: 1 – 180°C; 2 – 170°C; 3 – 160°C

Fig. 8. Dependences of the decimal logarithm of the thermal energy absorbed by the oxidation products on the decimal logarithm of the time and thermostating temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD: 1 – 180°C; 2 – 170°C; 3 – 160°C

$$170^{\circ}\text{C} \quad \Pi_{\text{тос}} = (2.524 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 + (5.806 \cdot 10^{-4}) \cdot t + 0.0089 \quad (13)$$

$$160^{\circ}\text{C} \quad \Pi_{\text{тос}} = (7.391 \cdot 10^{-6}) \cdot t^2 + (1.935 \cdot 10^{-4}) \cdot t + 0.0077 \quad (14)$$

Для определения температуры начала процессов преобразования в исследуемом масле с учетом процессов окисления и испарения, а также критических температур этих процессов необходимо провести на рис. 6 вертикальную штрихованную линию при $t = 40$ часов и определить значения коэффициента термоокислительной стабильности при каждой температуре, а также горизонтальную штрихованную линию при $\Pi_{\text{тос}} = 0.05$ и вычислить время достижения этого значения при каждой температуре.

Коэффициенты корреляции составили: 0.9972; 0.9947; 0.9945.

Средние квадратические отклонения: 0.0098; 0.0136; 0.0139.

По вычисленным данным построить графические зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от температуры испытания (рис. 7а) и времени термостатирования от температуры испытания (рис. 7б).

Данные зависимости описываются полиномом второго порядка, а регрессионные уравнения имеют вид:

$$\Pi_{\text{тос}} = 3.25 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0.102 \cdot T + 8.15 \quad (15)$$

$$T_{\Pi_{\text{тос}}} = 0.085 \cdot T^2 - 30.95 \cdot T + 2828 \quad (16)$$

Коэффициенты корреляции составили: 1; 1.

Средние квадратические отклонения: $1.128 \cdot 10^{-18}$; 0.

При решении уравнения (15) определяется

температура начала процессов преобразования в исследуемом масле с учетом процессов окисления и испарения, которая составила 158.15°C , а при решении уравнения (16) определяется критическая температура для исследуемого моторного масла, которая составила 184.12°C .

При термостатировании смазочный материал не может безгранично поглощать тепловую энергию, поэтому избыток ее он сбрасывает в виде продуктов окисления и испарения. В этой связи количество тепловой энергии Q_D поглощенной продуктами окисления определяется по формуле:

$$Q_D = T \cdot t \cdot D, \text{ ч} \cdot ^{\circ}\text{C} \quad (17)$$

Продуктами испарения:

$$Q_G = T \cdot t \cdot G, \text{ ч} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{г} \quad (18)$$

где T – температура термостатирования, $^{\circ}\text{C}$; t – время термостатирования, ч; D – оптическая плотность; G – масса испарившегося масла, г.

Суммарная тепловая энергия, поглощенная продуктами окисления и испарения, определяется по формуле:

$$Q_{\Pi_{\text{тос}}} = T \cdot t \cdot \Pi_{\text{тос}}, \text{ г} \cdot ^{\circ}\text{C} \quad (19)$$

где $\Pi_{\text{тос}}$ – коэффициент термоокислительной стабильности; T – температура термостатирования, $^{\circ}\text{C}$; t – время термостатирования, ч.

На рис. 8 представлены зависимости десятичного логарифма тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления от десятичного логарифма времени и температуры термостатирования исследуемого частично синтетического моторного масла. Данные зависимости описываются линейными уравнениями для температур:

$$180^{\circ}\text{C} \quad \lg Q_D = 0.158 \cdot t \lg t^2 + 2.157 \cdot t \lg t - 0.885 \quad (20)$$

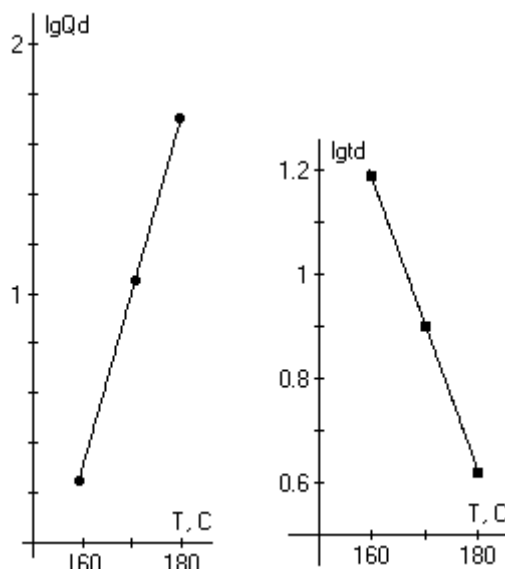


Рис. 9. Зависимости десятичного логарифма тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления при $lgt = 1.1$ (а) и десятичного логарифма времени испытания при $lgQ_D = 0.5$ (б) от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD
Fig. 9. Dependences of the decimal logarithm of the thermal energy absorbed by the oxidation products at $lgt = 1.1$ (a) and the decimal logarithm of the test time at $logQ_D = 0.5$ (b) on the thermostating temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD

$$170^{\circ}\text{C} \quad lgQ_D = 0.037 \cdot t^2 + 2.691 \cdot t - 1.955 \quad (21)$$

$$160^{\circ}\text{C} \quad lgQ_D = 0.121 \cdot t^2 + 2.620 \cdot t - 2.798 \quad (22)$$

Коэффициенты корреляции составили: 0.9994; 0.9995; 0.9997.

Средние квадратические отклонения: 0.0332; 0.0296; 0.0282.

Важными эксплуатационными показателями смазочных материалов являются температуры начала процессов окисления и критическая температура этого процесса. Для определения этих температур необходимо на зависимостях (рис. 8) провести вертикальную штрихованную линию при $lgt = 1.9$ (12.59 часа) и определить значения lgQ_D для каждой температуры, а также провести горизонтальную штрихованную линию при $lgQ_D = 0.5$ и определить значения lgt для каждой температуры. По полученным данным построить графические зависимости десятичного логарифма тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления (рис. 9а), и десятичного логарифма времени (рис. 9б) от температуры термостатирования. Данные зависимости описываются линейными уравнениями:

$$lgQ_D = 0.07 \cdot t - 10.9755 \quad (23)$$

$$lgt_D = -0.0279 \cdot t + 5.6537 \quad (24)$$

Коэффициенты корреляции составили: 0.9969; 0.9998.

Средние квадратические отклонения: 0.0429; 0.0056.

При решении уравнения (23) определяется температура начала процесса окисления, которая составила 156.5°C , а при решении уравнения (24) определяется критическая температура окисления,

которая составила -202.5°C .

Представленные на рис. 8 зависимости пересекают ось абсцисс, точки пересечения характеризуют десятичные логарифмы времени начала изменения десятичного логарифма тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления для каждой температуры термостатирования. На рис. 10 представлена зависимость десятичного логарифма времени начала процессов окисления от температуры термостатирования исследуемого масла. Данная зависимость описывается линейным уравнением.

$$lgt_{DN} = -0.0305 \cdot t + 5.9105 \quad (25)$$

Коэффициенты корреляции составили 0.9997.

Средние квадратические отклонения: 0.0069.

При решении уравнения (25) определяется критическая температура начала процессов окисления, которая составила 193.5°C . При этой температуре за один час испытания начинаются процессы окисления.

На рис. 11 представлены зависимости десятичного логарифма тепловой энергии, поглощенной продуктами испарения от десятичного логарифма времени и температуры испытания исследуемого масла. Данные зависимости описываются линейными уравнениями для температур:

$$180^{\circ}\text{C} \quad lgQ_G = 1.6707 \cdot t + 2.0263 \quad (26)$$

$$170^{\circ}\text{C} \quad lgQ_G = 1.7511 \cdot t + 1.6782 \quad (27)$$

$$160^{\circ}\text{C} \quad lgQ_G = 1.8128 \cdot t + 1.3056 \quad (28)$$

Коэффициенты корреляции составили 0.9993; 0.9997; 0.9999.

Средние квадратические отклонения: 0.0250;

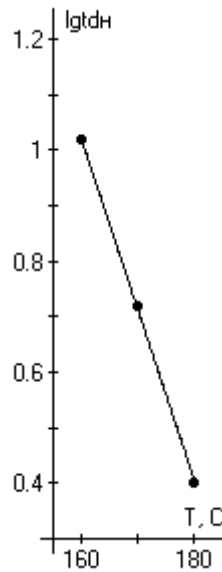


Рис. 10. Зависимость десятичного логарифма времени начала процессов окисления от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD при $lgQ_D = 0$

Fig. 10. Dependence of the decimal logarithm of the onset of oxidation processes on the thermostating temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD at $lgQ_D = 0$

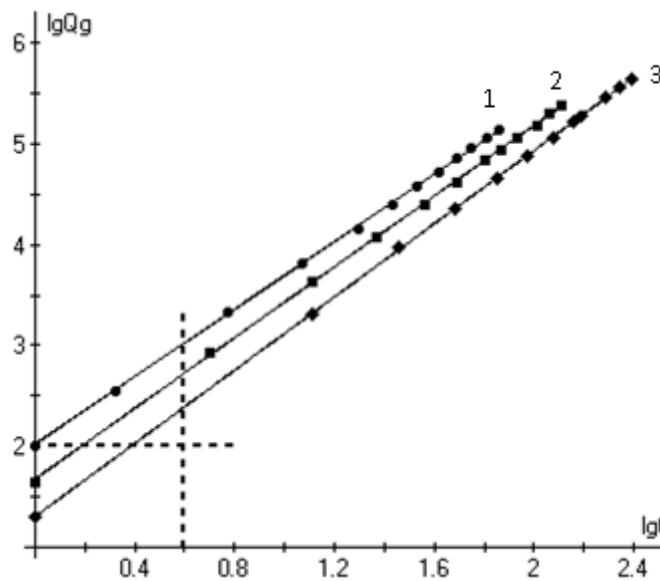


Рис. 11. Зависимости десятичного логарифма тепловой энергии поглощенной продуктами испарения, от десятичного логарифма времени и температуры испытания частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD: 1 – 180°C; 2 – 170°C; 3 – 160°C

Fig. 11. Dependences of the decimal logarithm of thermal energy absorbed by evaporation products on the decimal logarithm of the testing time and temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD: 1 – 180°C; 2 – 170°C; 3 – 160°C

0.0184; 0.0122.

Важными эксплуатационными показателями смазочных материалов являются температура начала процессов испарения и критическая температура. Для определения этих температур необходимо на зависимостях (рис. 11) провести

вертикальную штрихованную линию при $lgt = 0.6$ (3.98 часа), определив значения lgQ_G для каждой температуры, и провести горизонтальную штриховую линию при $lgQ_G = 2$, определив значения lgt для каждой температуры. По вычисленным данным построить графические

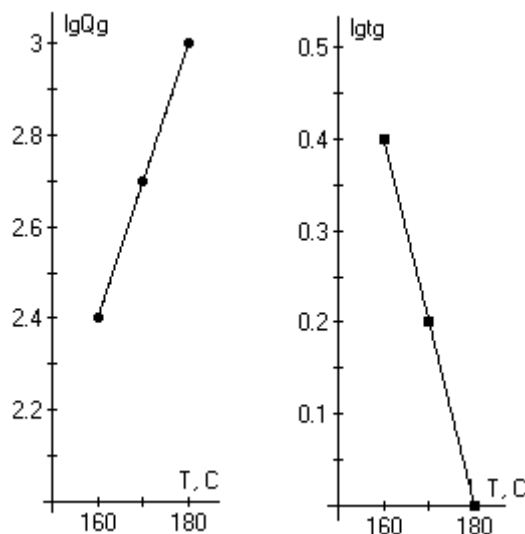


Рис. 12. Зависимости десятичного логарифма тепловой энергии, поглощенной продуктами испарения при $lgt = 0.6$ (а), и десятичного логарифма времени испытания при $lgQ_G = 2$ (б) от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD
 Fig. 12. Dependences of the decimal logarithm of the thermal energy absorbed by the evaporation products at $lgt = 0.6$ (a) and the decimal logarithm of the test time at $logQ_G = 2$ (b) on the thermostating temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD

зависимости десятичного логарифма тепловой энергии, поглощенной продуктами испарения (рис. 12а), и десятичного логарифма времени (рис. 12б) от температуры испытания. Данные зависимости описываются линейными уравнениями:

$$lgQ_G = 0.03 \cdot t - 2.4 \quad (29)$$

$$lgt_G = -0.02 \cdot t + 3.6 \quad (30)$$

Коэффициенты корреляции составили 1;1.

Средние квадратические отклонения: $2.7993 \cdot 10^{-19}$; $6.4285 \cdot 10^{-20}$.

При решении уравнения (29) определяется температура начала испарения исследуемого масла, которая составила 80°C , а при решении уравнения (30) определяется критическая температура испарения для исследуемого моторного масла, которая составила 180°C .

Представленные на рис. 11 зависимости пересекают ось ординат, точки пересечения характеризуют значения десятичных логарифмов тепловой энергии, при которых начинают процессы испарения. На рис. 13 представлена зависимость десятичного логарифма тепловой энергии начала процессов испарения от температуры испытания. Данная зависимость описывается линейным уравнением.

$$lgQ_G = 0.035 \cdot t - 4,3 \quad (31)$$

Коэффициенты корреляции составили 1.

Средние квадратические отклонения: $2.7641 \cdot 10^{-19}$.

При решении уравнения (31) определяется температура, при которой начинаются изменения десятичного логарифма тепловой энергии испарения, которая составила 122°C .

На рис. 14 представлены зависимости десятичного логарифма суммарной тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления и испарения, от десятичного логарифма времени и температуры испытания исследуемого масла. Данные зависимости описываются линейными уравнениями для температур:

$$180^\circ\text{C} \quad lg\Pi_{\text{ТОС}} = 2.2761 \cdot t - 0.4597 \quad (32)$$

$$170^\circ\text{C} \quad lg\Pi_{\text{ТОС}} = 2.3379 \cdot t - 0.9442 \quad (33)$$

$$160^\circ\text{C} \quad lg\Pi_{\text{ТОС}} = 2.3757 \cdot t - 1.4526 \quad (34)$$

Коэффициенты корреляции составили 0.9992; 0.9990; 0.9985.

Средние квадратические отклонения: 0.0356; 0.0428; 0.0578.

Для определения температур начала процессов преобразования в исследуемом масле с учетом процессов окисления и испарения, а также критической температуры этих процессов необходимо на зависимостях (рис. 14) провести вертикальную штриховую линию при $lgt = 0.7$ (5 часов) и определить значения $lgQ_{\text{ПТОС}}$ для каждой температуры, а также горизонтальную штриховую линию при $lgQ_{\text{ПТОС}} = 0.5$ и определить десятичные логарифмы времени достижения этого значения при каждой температуре. По вычисленным данным построить графические зависимости десятичного логарифма суммарной тепловой энергии (рис. 15а) и десятичного логарифма времени достижения установленного значения $lgQ_{\text{ПТОС}} = 0.5$ (рис. 15б) от температуры испытания. Данные зависимости описываются линейными уравнениями.

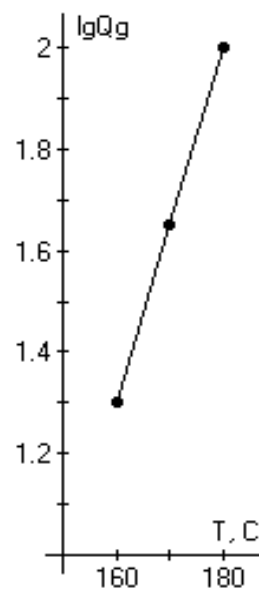


Рис. 13. Зависимость десятичного логарифма тепловой энергии начала процессов испарения от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD при $lgt = 0$

Fig. 13. Dependence of the decimal logarithm of the thermal energy of the onset of evaporation processes on the thermostating temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD at $lgt = 0$

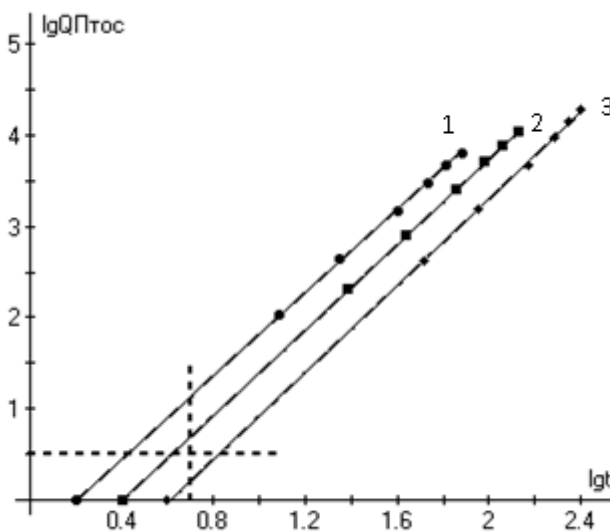


Рис. 14. Зависимости десятичного логарифма суммарной тепловой энергии поглощенной продуктами окисления и испарения от десятичного логарифма времени и температуры испытания частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD: 1 – 180 °C; 2 – 170 °C; 3 – 160 °C

Fig. 14. Dependences of the decimal logarithm of the total thermal energy absorbed by the products of oxidation and evaporation on the decimal logarithm of the testing time and temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD: 1 – 180 °C; 2 – 170 °C; 3 – 160 °C

$$\lg Q_{\text{Птос}} = 0.047 \cdot t - 7.31 \quad (35)$$

$$\lg t_{\text{Птос}} = -0.017 \cdot t + 3.54 \quad (36)$$

Коэффициенты корреляции составили 1; 0.9928.

Средние квадратические отклонения: $7.3690 \cdot 10^{-19}$, 0.0144.

При решении уравнения (35) определяется температура начала процессов преобразований в исследуемом масле, которая составила 156 °C, а при решении уравнения (36) определяется критическая температура, которая составила с учетом процессов окисления и испарения 200 °C.

Представленные на рис. 14 зависимости пересекают ось абсцисс, точки пересечения характеризуют десятичные логарифмы времени начала изменения десятичного логарифма суммарной тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления и испарения. По этим данным построена графическая зависимость десятичного логарифма времени начала процессов преобразования в исследуемом масле от температуры испытания (рис. 16).

Данная зависимость описывается линейным уравнением:

$$\lg t_{\text{Птос}} = -0.02 \cdot t + 3.8 \quad (37)$$

Коэффициенты корреляции составили: 1.

Средние квадратические отклонения: $8.1690 \cdot 10^{-20}$.

При решении уравнения (37) определяется температура начала процессов преобразований в исследуемом моторном масле с учетом процессов окисления и испарения, которая составила 190 °C. При этой температуре за один час термостатирования начинает изменяться десятичный логарифм суммарной тепловой энергии, т.е. это есть критическая температура для исследованного частично-синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD.

Выводы. В результате проведенных исследований и сравнения полученных результатов

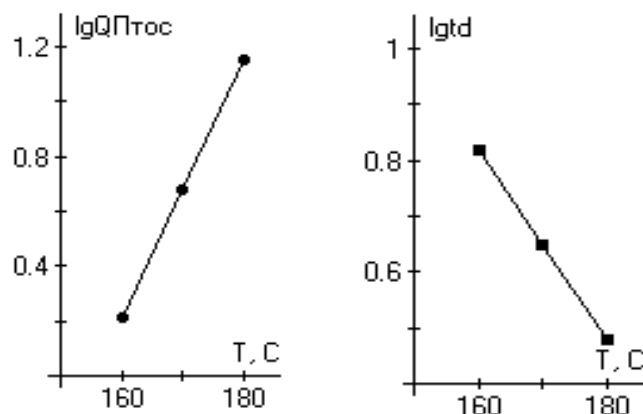


Рис. 15. Зависимости десятичного логарифма суммарной тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления и испарения при $lgt = 0.7$ (а), и десятичного логарифма времени испытания при $lgQ_{Птос} = 0.5$ (б) от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла Лукойл Супер 10w-40 SG/CD

Fig. 15. Dependences of the decimal logarithm of the total thermal energy absorbed by the products of oxidation and evaporation at $lgt = 0.7$ (a) and the decimal logarithm of the test time at $logQ_{Ptos} = 0.5$ (b) on the thermostating temperature of a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD

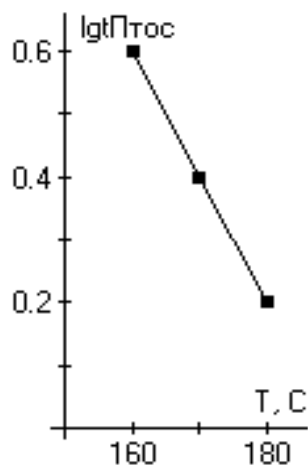


Рис. 16. Зависимость десятичного логарифма времени начала процессов преобразования в частично-синтетическом моторном масле Лукойл Супер 10w-40 SG/CD с учетом процессов окисления и испарения от температуры термостатирования $lgQ_{Птос} = 0$

Fig. 16. Dependence of the decimal logarithm of the start time of the conversion processes in a partially synthetic engine oil Lukoil Super 10w-40 SG / CD, taking into account the processes of oxidation and evaporation, on the thermostating temperature $logQ_{Ptos} = 0$

по температурам начала процессов окисления, испарения и температурных преобразований, протекающих в исследуемом масле, а также критическим температурам этих процессов, показано, что второй метод контроля показателей термоокислительной стабильности более точный,

т.к. все зависимости десятичных логарифмов тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления, испарения и температурных преобразований, описываются линейными уравнениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применения: справочник / И. Г. Анисимов, К. М. Бадычова, С. А. Бачив[и др.]; под ред. В. М. Школьникова. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: издат. центр «Техинформ», 1999 – 596с.

2. Виноградова И. Э. Противоизносные присадки к маслам / И. Э. Виноградова. – М.: Химия, 1972 – 272 с.
3. ГОСТ 20457–75. Масла моторные, метод оценки антиокислительных свойств на установке ИКМ.
4. ГОСТ 23175–78. Масла моторные. Метод оценки моторных свойств и определения термоокислительной стабильности.
5. ГОСТ 11063–77. Масла моторные с присадками. Метод определения стабильности по индукционному периоду осадкообразования.
6. ГОСТ 981–75. Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления.
7. ГОСТ 18136–72. Масла. Метод определения стабильности против окисления в универсальном приборе.
8. Гольберг, Д. О. Контроль производства масел и парафинов / Д. О. Гольберг. – М.: Химия, 1964. – 245 с.
9. Черножуков Н. И. Окисляемость минеральных масел / Н. И. Черножуков, С. Е. Крейн. – М.; Л.: Гостоптехиздат, 1955. – 372 с.
10. Непогодьев А. В. Механизм окисления масла в поршневых двигателях // Химия и технология топлив и масел, 1977, № 4. с. 34-38
11. Кондаков, Л. А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л. А. Кондаков. – М.: Машиностроение, 1982. – 216с.
12. Ковальский, Б. И. Методы и средства повышения эффективности использования смазочных материалов / Б. И. Ковальский. – Новосибирск: Наука. – 2005. – 341с.
13. Безбородов Ю. Н. Методы контроля и диагностики эксплуатационных свойств смазочных материалов по параметрам термоокислительной стабильности и температурной стойкости: Монография / Ю. Н. Безбородов, Б. И. Ковальский, Н. Н. Малышева, А. Н. Сокольников, Е. Г. Мальцева – Красноярск: Сиб. федерал. ун-т, Ин-т нефти и газа. – Красноярск : СФУ, 2011. – 358 с.
14. Скиндер, Н. И. Переносной комплекс средств экспресс-диагностики исправного моторного масла / Н. И. Скиндер, Ю. А. Гурьянов // НТТМ. – 2001 – Т. 1. – с. 38-40.
15. Fhoenes, H. W. Evfahrungen mit der Vickers - uenpumpe / H.W. Fhoenes, K. Baner, P. Herman // schiertechnik Tribologie. – 1978 – №4, август. S9.
16. Стадт П. Граничная смазка: Tribology Int. – 1989 (22). – № 2. – С. 111-119.

REFERENCES

1. Fuels, lubricants, technical fluids. Range and applications: reference book / I. G. Anisimov, K. M. Badyichova, S. A. Bachiv [and others]; ed. V. M. Shkolnikov. Ed. 2nd revised and add. - M. : publ. Center "Techinform", 1999 – 596s.
2. Vinogradova I. E. Antiwear additives to oils / I. E. Vinogradov. - M. : Chemistry, 1972 – 272 p.
3. GOST 20457–75. Motor oils, a method for evaluating antioxidant properties using an IKM unit.
4. GOST 23175–78. Motor oils. A method for evaluating motor properties and determining thermo-oxidative stability.
5. GOST 11063–77. Motor oils with additives. Method for determining stability by the induction period of sedimentation.
6. GOST 981–75. Petroleum oils. Method for the determination of oxidation stability.
7. GOST 18136–72. Oils. Method for the determination of oxidation stability in a universal instrument.
8. Golberg, D. O. Control of the production of oils and paraffins / D. O. Golberg. - M. : Chemistry, 1964 . – 245 p.
9. Chernozhukov N. I. Oxidizability of mineral oils / N. I. Chernozhukov, S. E. Crane. – M. ; L. : Gostoptekhizdat, 1955 . – 372 p.
10. Nepogodiev A. B. The mechanism of oil oxidation in piston engines // Chemistry and technology of fuels and oils, 1977, No. 4. p. 34-38.
11. Kondakov, L. A. Working fluids and seals of hydraulic systems / L. A. Kondakov. - M. : Mechanical engineering, 1982 . – 216s.
12. Kovalsky, B. I. Methods and means of increasing the efficiency of using lubricants / B. I. Kowalski. - Novosibirsk: Science. - 2005 . – 341s.
13. Yu. N. Bezborodov. Methods for monitoring and diagnostics of the operational properties of lubricants by the parameters of thermal-oxidative stability and temperature resistance: Monograph / Yu. N. Bezborodov, B.

I. Kovalsky, N. N. Malysheva, A. N. Sokolnikov, E. G. Maltseva - Krasnoyarsk: Sib. federal un-t, Institute of oil and gas. - Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2011 . – 358 p.

14. Skinder, N. I. Portable complex of means for express diagnostics of working engine oil / N. I. Skinder, Yu. A. Guryanov // НТТМ. – 2001 – Т. 1. – p. 38-40.

15. Fhoenes, H. W. Evfahrungen mit der Vickers - Emgelse - uenpumpe / H.W. Fhoenes, K. Baner, P. Herman // schiertechnik Tribologie. – 1978 – №4, August. S9.

16. Studt, P. Boundary Lubrication: Tribology Int. – 1989 (22). – № 2. – P. 111-119.

Поступило в редакцию 10.12.2020

Received 10 December 2020