

Расчет плотности моторного авиационного масла марки МС-20 при различных температурах и давлениях

© В.А. Алтунин¹, М.В. Львов¹, А.А. Щиголев¹,
А.А. Юсупов¹, М.Л. Яновская²

¹КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Россия

²ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Россия

Показано, что в системах смазки двигателей летательных аппаратов возникают различные проблемы, связанные с качеством моторных авиационных масел, со сложными термодинамическими условиями их эксплуатации, с негативным процессом осадкообразования, с конструктивными особенностями и недостатками поршневых авиационных двигателей внутреннего сгорания, воздушно-реактивных двигателей, различных авиационных и наземных энергоустановок, а также их фильтрующих и охлаждающих систем. Отмечено, что при проектировании и создании новой техники широко используются моторные авиационные масла различных марок и свойств, поэтому ученому, проектировщику, инженеру, конструктору нужно знать не только общие свойства выбранного масла, но и его теплофизические свойства — плотность, теплопроводность, вязкость, теплоемкость. Рассмотрена зависимость плотности моторного авиационного масла марки МС-20 от различных температур и давлений. Проведено сравнение характеристик этого масла из указанных источников информации, в которых даны значения плотности при различных температурах и нормальном давлении, имеющие различия. Представлены способы получения значений плотности моторных авиационных масел, в том числе и масла марки МС-20, при экспериментальных исследованиях, при использовании номограмм, графиков и таблиц, при проведении расчетов по различным методикам. Представлены методика расчета плотности масла марки МС-20 при повышении температуры и давления, принятая в Государственных стандартах, а также новая сокращенная и эффективная методика расчета плотности моторных авиационных масел при изменении температуры и давления, включая и масло марки МС-20. Даны рекомендации по правильному выбору температуры и давления для учета плотности моторных авиационных масел при их использовании в процессе создания новой отечественной наземной, воздушной, гиперзвуковой и аэрокосмической техники одно- и многоцелевого назначения с повышенными характеристиками по ресурсу, надежности и эффективности.

Ключевые слова: моторное авиационное масло, теплофизические свойства, температура, давление, плотность, расчет, двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Введение. При проектировании, расчете и создании систем смазки для двигателей и энергоустановок (ЭУ) летательных аппаратов (ЛА) и наземных техносистем (ТС) требуется информация не только об общих свойствах моторного авиационного масла, но и о его теплофизических свойствах (ТФС) — плотности, теплопроводности, вязкости и теплоемкости [1–24]. В данной статье представлен расчет плотности моторного авиационного масла, в частности, марки МС-20,

так как оно и его смеси с другими подобными маслами широко используют в различных двигателях и ЭУ ЛА и наземных ТС, и, кроме того, о нем приведено много информации в различных изданиях.

Практически для всех моторных авиационных масел можно легко и быстро найти общую техническую информацию, а также значения их ТФС, в том числе плотность. Проблема, с которой сталкиваются ученые, конструкторы, проектировщики и создатели новой техники, заключается в том, что значения ТФС масел приведены при разных температурах, но только при нормальном давлении, в связи с чем очень часто при тепловых расчетах им приходится ограничиваться параметрами ТФС моторных авиационных масел именно при нормальном давлении. Однако известно, что в системах смазки авиационных двигателей и ЭУ ЛА и наземных ТС моторные авиационные масла находятся в сложных термодинамических условиях, т. е. при различных температурах, давлениях и скоростях прокачки. Поэтому когда в расчетах тепловых процессов в системах смазки принимают значения параметров ТФС при различных температурах и лишь одном нормальном давлении, результаты получаются некорректными и неточными, что повлечет, в свою очередь, целый ряд неправильных расчетов при конструировании и создании авиационных двигателей, ЭУ ЛА и наземных ТС. В итоге при их эксплуатации это может привести к сокращению штатного ресурса выпущенных изделий и возникновению в них аномальных и опасных тепловых процессов, например осадкообразования, к аварийным ситуациям и даже авариям, в том числе с возникновением пожара и взрыва.

Цель данной статьи — показать, как повышение давления влияет на изменение значения плотности моторного авиационного масла, например, марки МС-20.

Для решения поставленной задачи требуется:

- провести обзор научно-технической литературы и проанализировать приведенные в этих источниках значения плотности моторного авиационного масла марки МС-20 при различных температурах и давлениях;
- показать возможные способы определения плотности моторных авиационных масел, в том числе и масла марки МС-20;
- раскрыть методы расчета плотности моторных авиационных (и других) масел при различных температурах и давлениях;
- графическими и табличными средствами показать, каким образом повышение давления влияет на изменение плотности моторного авиационного масла, включая и масло марки МС-20;
- разработать способ быстрого и эффективного расчета плотности моторного авиационного масла марки МС-20 и других нефтяных масел.

Обзор и анализ значений плотности моторного авиационного масла марки МС-20 при различных температурах и давлениях. Общие технические характеристики моторных авиационных масел приведены в справочниках и иной технической литературе. Как правило, они представлены в табличном виде, где при нормальном давлении даны значения кинематической вязкости, индекс вязкости, коксуемость и другие параметры, а также плотность масла при температуре 293К (20 °С). Для примера ниже приведены параметры для моторного авиационного масла марки МС-20 [1–6].

Техническая характеристика МС-20

	Норма по ГОСТу (ТУ)
Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с, не менее	20,5
Индекс вязкости, не менее	80
Коксуемость, %, не более	0,29
Содержание селективных растворителей, водорастворимых кислот и щелочей, механических примесей	Нет
Температура, °С:	
вспышки в открытом тигле, не ниже	265
застывания, не выше	–18
Термоокислительная стабильность по методу Папок при 250 °С, мин, не менее	18
Коррозийность на пластинках из свинца марок С-1 или С-2 по ГОСТ 3778–77, г/см ² , не более	18
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не более	897

Дается также краткая характеристика основных параметров, свойств и применимости масла, например, для моторного авиационного масла марки МС-20: масло МС-20 (ГОСТ 21743–76) — авиационное масло селективной очистки; изготавливается из беспарафиновых и парафиновых нефтей с низким содержанием серы; обладает высокой вязкостью, отличной адгезией, хорошими смазывающими свойствами и температурой вспышки не ниже 265 °С; применяется в поршневых двигателях самолетов; в составе масла — смеси с маслами МС-8П, МС-8 (в различных соотношениях) в смазочных системах турбовинтовых двигателей; в осевых шарнирах втулок винтов вертолетов; для смазывания мотокомпрессоров газоперекачивающих агрегатов, а также в качестве базового компонента для некоторых моторных масел и смазок.

Анализ научно-технической литературы по моторному авиационному маслу марки МС-20 [1–6] показал, что значения плотности данного масла при нормальном давлении и повышении температуры у всех авторов (и во всех источниках информации) имеют различия, и это наглядно отражено в табл. 1. Необходимо отметить следующее:

– особенно большие расхождения плотности (на несколько десятков единиц) данного масла наблюдается при отрицательной температуре 263К (–10 °С);

– информация о плотности данного масла при отрицательной температуре 263К (–10 °С) есть только в двух источниках информации [4, 6], при температурах 273К (0 °С) и 283К (10 °С) — лишь в трех — [1, 4, 6], при температуре 293К (20 °С) — в [1–6], при температурах от 303К (30 °С) до 423К (150 °С) — только в [1, 2, 4, 6];

– нет единых и одинаковых данных по плотности моторного авиационного масла марки МС-20 при нормальном давлении и разных температурах;

– практически отсутствуют данные по плотности моторного авиационного масла марки МС-20 при различных температурах, и давлениях.

Таблица 1

Плотность моторного авиационного масла марки МС-20 при различных температурах и атмосферном давлении в работах разных авторов

Температура, К	Плотность, кг/м ³ , в работе					
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
263	–	–	–	910,7	–	990,3
273	903,6	–	–	904,5	–	903,6
283	898,0	–	–	898,2	–	897,9
293	892,5	893,8	897,0	892,0	895,0	892,3
303	886,5	887,7	–	885,7	–	886,6
313	881,0	881,6	–	879,3	–	881,0
323	875,5	875,5	–	873,0	–	875,3
333	869,6	869,4	–	866,6	–	869,6
343	864,0	863,3	–	860,2	–	864,0
353	858,5	857,2	–	853,8	–	858,3
363	852,5	851,1	–	847,4	–	852,7
373	847,0	845,0	–	840,9	–	847,0
383	841,5	838,9	–	834,4	–	841,3
393	835,5	832,8	–	827,9	–	835,7
403	830,0	826,7	–	821,5	–	830,0
413	824,5	820,6	–	814,9	–	824,4
423	818,5	814,5	–	808,4	–	818,7

Способы получения значений плотности моторных авиационных масел. Один из основных и точных способов определения плотности моторных масел — эксперимент, а самый простой и доступный способ ее определения при различных температурах и нормальном давлении — объемно-весовой, при котором используются коэффициент объемного расширения масла при разных температурах, а также основная формула для определения плотности веществ.

Данный способ применяется не только в специальных научных лабораториях, но и на практических и лабораторных занятиях в технических вузах [19].

Более трудоемкими и сложными являются эксперименты с моторными авиационными маслами при их различных температурах и давлениях, что обусловлено применением специального оборудования и приборов контроля: с экспериментальной бомбой высокого давления и рабочими участками, с датчиками давления и температуры и пр.

Другие экспериментальные способы определения плотности моторных масел являются побочными (или вторичными), выполняемыми с использованием:

1) номограмм [7], разработанных по результатам экспериментов. Этот способ является трудоемким и самым неточным, так как дает большие погрешности из-за проведения связующих линий и применения нескольких шкал с разными пошаговыми разметками и разнородными оцифровками;

2) таблиц [1–6, 8–17, 19], полученных также экспериментально. Данный способ является более точным, чем предыдущий, но когда необходимо найти промежуточные значения плотности, расположенные между двумя конкретными значениями температуры или давления, требуется провести дополнительные уточняющие и корректирующие расчеты с помощью методов пропорционального исчисления;

3) графиков [1–6, 8–17, 19], построенных по таблицам, созданным в ходе или после проведения экспериментов. Этот способ также является довольно точным, при его применении не требуется проведение дополнительных промежуточных расчетов.

Плотность моторных авиационных масел при различных температурах и давлениях можно определить и расчетным (аналитическим) путем с помощью формул, также созданных на основе первичных экспериментальных данных. Каждая из новых формул проходит несколько стадий развития и формирования. По полученной на первой стадии формуле рассчитывается плотность моторного авиационного масла при различных значениях давления и температуры, а затем расчетные данные сравнивают с экспериментальными, выявляются отклонения полученных результатов и ошибки. После этого проанализированная формула подвергается корректировке в целях уменьшения различий между расчетными значениями плотности и полученными экспериментально при конкретных одинаковых температурах и давлениях. В результате выводится вторая формула, которая также проверяется с целью уменьшить различия между расчетными и экспериментальными значениями. Если необходимо, то формируются и последующие формулы, а самой точной из них можно считать ту, расчет по которой приведет к наименьшему различию между вычисленными и экспериментальными данными.

Благодаря созданию таких экспериментально-расчетных формул расчетный (аналитический) путь определения плотности моторного авиационного масла будет довольно точным, а главное, не придется проводить сложные и дорогостоящие эксперименты в широком диапазоне давлений и температур.

Рекомендации по метрологии Р 50.2.076–2010 [4] содержат универсальную методику расчета плотности нефти, нефтепродуктов и смазочных масел в зависимости от температуры и давления. Там предлагается находить плотность смазочного масла в зависимости от температуры и давления с помощью либо таблиц пересчета, либо формул:

$$\rho_{tp} = \frac{\rho_{15} \exp\{-\beta_{15} (t - 15) [1 + 0,8\beta_{15} (t - 15)]\}}{1 - \gamma_t p}, \quad (1)$$

$$\beta_{15} = \frac{0,6278\rho_{15}}{\rho_{15}^2}, \quad (2)$$

где ρ_{15} — плотность при температуре 15 °С и избыточном давлении, равном нулю, кг/м³; γ_t — коэффициент сжимаемости при температуре t , МПа⁻¹ (t — температура смазочного масла, °С); ρ_{tp} — плотность при температуре t и избыточном давлении p , кг/м³; β_{15} — коэффициент объемного расширения смазочных масел (при температуре 15 °С), °С⁻¹.

В обоих случаях для определения плотности конкретного смазочного масла необходимо знать плотность при $t = 15$ °С и атмосферном давлении. Значения плотности для моторного масла МС-20, вычисленного по методике [4], приведены в табл. 2.

Полученные значения в таблицах пересчета [4] ограничены диапазоном (–50...100) °С, поэтому авторы данной статьи провели вычисления по формулам (1) и (2), действующим в диапазоне (–50...150) °С, и было получено, что результаты совпадают с приведенными в таблицах пересчета.

Рассчитать плотность смазочных масел в зависимости от давления можно не только с помощью формул (1) и (2), но и по упрощенной формуле [4]

$$\rho_{tp_2} = \frac{\rho_{tp_1}}{1 - \gamma_t (p_2 - p_1)}, \quad (3)$$

где ρ_{tp_2} — плотность при температуре t и избыточном давлении p_2 , кг/м³; ρ_{tp_1} — плотность при температуре t и избыточном давлении p_1 , кг/м³; p_2 — избыточное давление смазочного масла, МПа.

Плотность масла марки МС-20 в зависимости от температуры и избыточного давления, вычисленная по формулам (1), (2), (4)

Температура, К	Плотность, кг/м ³ , при избыточном давлении, МПа,						
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
263	910,7	911,0	911,2	911,5	911,7	912,0	912,2
273	904,5	904,8	905,0	905,3	905,5	905,8	906,1
283	898,2	898,5	898,8	899,1	899,3	899,6	899,9
293	892,0	892,2	892,5	892,8	893,1	893,4	893,7
303	885,7	886,0	886,3	886,6	886,9	887,2	887,5
313	879,3	879,6	880,0	880,3	880,6	880,9	881,3
323	873,0	873,3	873,6	874,0	874,3	874,7	875,0
333	866,6	867,0	867,3	867,7	868,0	868,4	868,7
343	860,2	860,6	860,9	861,3	861,7	862,1	862,4
353	853,8	854,2	854,6	855,0	855,3	855,7	856,1
363	847,4	847,8	848,2	848,6	849,0	849,4	849,8
373	840,9	841,3	841,8	842,2	842,6	843,0	843,5
383	834,4	834,9	835,3	835,8	836,2	836,7	837,1
393	827,9	828,4	828,9	829,4	829,8	830,3	830,8
403	821,5	821,9	822,4	822,9	823,4	823,9	824,4
413	814,9	815,5	816,0	816,5	817,0	817,5	818,0
423	808,4	809,0	809,5	810,0	810,6	811,1	811,7

Допустимый диапазон давлений для формулы (1) — $p = (0 \dots 10)$ МПа, а для формулы (3) — $p = (0 \dots 5)$ МПа. Для расчета плотности масла при разном давлении используется коэффициент сжимаемости (см. формулу (3) [4]), который можно вычислить либо с помощью таблиц пересчета, либо по формуле

$$\gamma_t = 10^{-3} \exp \left(-1,62080 + 0,00021592t + \frac{0,87096 \cdot 10^6}{\rho_{15}^2} + \frac{4,2092 t \cdot 10^3}{\rho_{15}^2} \right). \quad (4)$$

Следует отметить, что авторы [4] в методиках расчета плотности используют не абсолютное давление, а избыточное, т. е. в формуле (3) в рассматриваемом случае для атмосферного давления $p_1 = 0$. Далее в представлении результатов расчета также будем использовать избыточное давление.

Значения плотности моторного авиационного масла МС-20 при различном избыточном давлении, рассчитанные по формулам (1), (2), (4), приведены в табл. 2. Уточненные значения плотности этого масла в зависимости от избыточного давления, вычисленные по формуле (3) с использованием в качестве исходных данных справочные значения плотности при атмосферном давлении (см. табл. 1) [6], представлены в табл. 3 и на рис. 1. В обоих случаях использовался коэффициент сжимаемости, рассчитанный по формуле (4), значения которого приведены в табл. 4 и на рис. 2.

Таблица 3

Плотность масла марки МС-20 в зависимости от температуры и избыточного давления, вычисленная по формуле (3)

Температура, К	Плотность, кг/м ³ , при избыточном давлении, МПа, равном						
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
263	990,3	990,6	990,9	991,1	991,4	991,7	992,0
273	903,6	903,9	904,1	904,4	904,7	904,9	905,2
283	897,9	898,2	898,5	898,7	899,0	899,3	899,6
293	892,3	892,6	892,9	893,2	893,5	893,8	894,1
303	886,6	886,9	887,2	887,5	887,8	888,1	888,4
313	881,0	881,3	881,6	882,0	882,3	882,6	882,9
323	875,3	875,6	876,0	876,3	876,7	877,0	877,3
333	869,6	870,0	870,3	870,7	871,0	871,4	871,7
343	864,0	864,4	864,7	865,1	865,5	865,9	866,2
353	858,3	858,7	859,1	859,5	859,9	860,3	860,6
363	852,7	853,1	853,5	853,9	854,3	854,8	855,2
373	847,0	847,4	847,9	848,3	848,7	849,2	849,6
383	841,3	841,8	842,2	842,7	843,1	843,6	844,0
393	835,7	836,2	836,6	837,1	837,6	838,1	838,5
403	830,0	830,5	831,0	831,5	832,0	832,5	833,0
413	824,4	824,9	825,4	826,0	826,5	827,0	827,5
423	818,7	819,2	819,8	820,3	820,9	821,4	822,0

Таблица 4

Коэффициент сжимаемости масла марки МС-20 в зависимости от температуры, вычисленный по формуле (4)

Температура, К	Коэффициент сжимаемости $\gamma_t \cdot 10^3$, МПа ⁻¹
263	0,555198
273	0,586
283	0,619
293	0,654
303	0,691
313	0,730
323	0,771
333	0,814
343	0,860
353	0,908
363	0,959
373	1,013
383	1,070
393	1,130
403	1,194
413	1,261
423	1,332

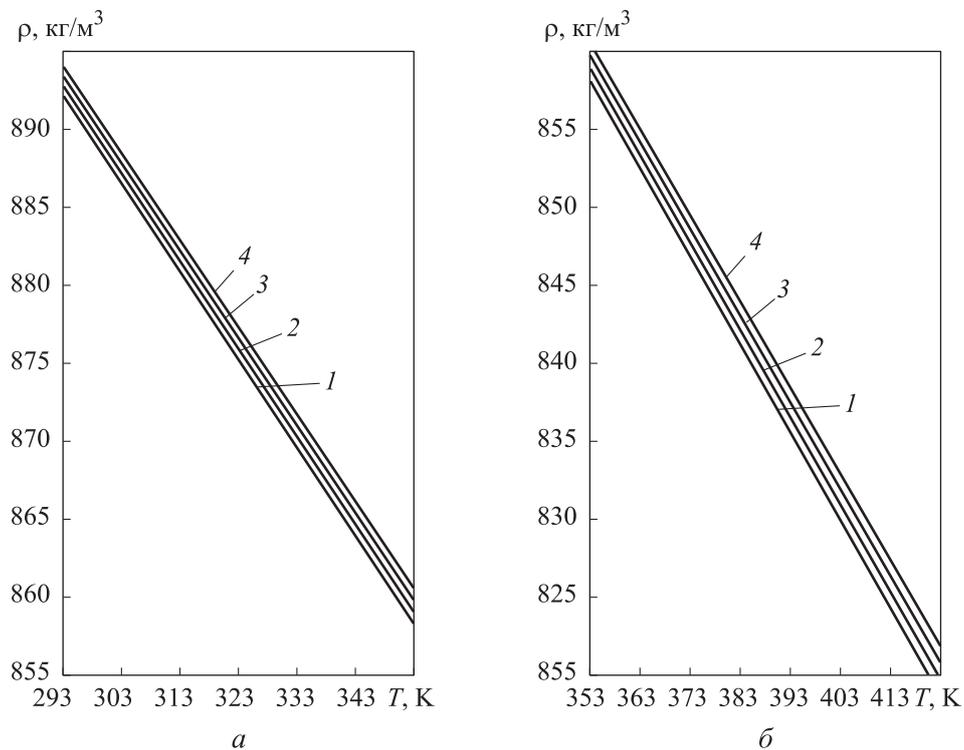


Рис. 1. Зависимость плотности масла МС-20 в диапазоне температур (293...353)К (а) и (353...423)К (б) при избыточном давлении p , равном: 0 (1); 1 МПа (2); 2 МПа (3); 3 МПа (4)

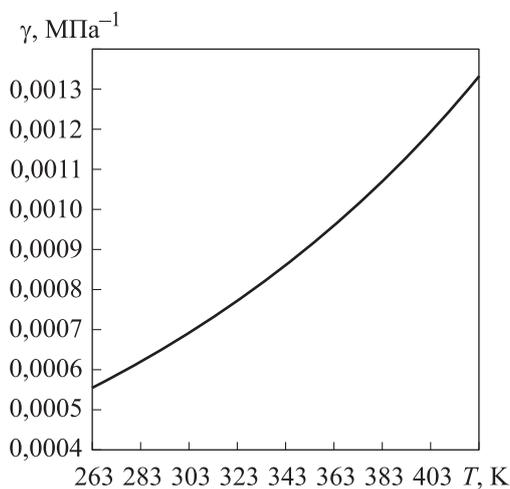


Рис. 2. Зависимость коэффициента сжимаемости масла МС-20 от температуры

При использовании графика зависимости коэффициента сжимаемости γ от температуры (см. рис. 2) отпадает необходимость проведения дополнительных расчетов при его нахождении в промежуточных

точках температур на оси абсцисс, что приходится делать при использовании табличных данных.

При использовании графиков зависимости плотности масла МС-20 от температуры при разных давлениях (см. рис. 1) также отсутствует необходимость в проведении дополнительных расчетов при определении конкретных значений плотности в промежуточных точках температур на оси абсцисс, что приходится выполнять в случае использования табличных данных.

Значения плотности моторного авиационного масла марки МС-20, рассчитанные по разным формулам и показанные в табл. 2, 3, имеют различия. Наиболее точные и достоверные данные, полученные при расчете плотности масла МС-20 по формуле (3) (см. табл. 3, рис. 1), легли в основу разработки как новой эффективной методики определения плотности этого масла при различных температурах и давлениях, так и общей методики быстрого и эффективного определения плотности для любого нефтяного (минерального) моторного авиационного масла при различных давлениях и температурах.

Разработка новой методики расчета плотности моторного авиационного масла марки МС-20 и других нефтяных масел. На графиках (см. рис. 1, а, б), построенных на основе данных табл. 3, видно, что рабочая линия 1 графика зависимости плотности масла марки МС-20 от температуры при избыточном давлении $p_1 = 0$ является гипотенузой прямоугольного треугольника, где катетами будут оси координат с конкретными цифровыми значениями плотности и температуры, а гипотенуза совместно с прилегающим катетом (с осью абсцисс) образует угол наклона α этой гипотенузы. Для последующих наклонных рабочих линий 2–4 углы наклона будут другими, в данном случае меньшими, чем для линии 1. Открывается возможность найти тангенс этого угла наклона гипотенузы (наклонной рабочей линии 1) к оси абсцисс, но для этого нужно знать значение плотности масла (на оси ординат), например, при начальной температуре 293К и при какой-то другой, более высокой, например, в точке пересечения наклонной рабочей линии 1 с осью абсцисс.

На основе графиков, показанных на рис. 1, а также при использовании данных табл. 3 можно определить тангенс угла α для наклонной рабочей линии 1 и индивидуальные углы наклона для каждой последующей рабочей наклонной линии 2–4 при соответствующем давлении по общей формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = [(\rho_2 - \rho_1) / \rho_0] / [(T_2 - T_1) / T_0], \quad (5)$$

где ρ_2 — плотность масла при начальной температуре $T_1 = 293\text{К}$, кг/м^3 ; ρ_1 — плотность масла при более высокой температуре T_2 , кг/м^3 ; ρ_0 — нулевое значение плотности масла (чтобы сократить обозначение размерности плотности в формуле (5)); T_1 — начальная температура

масла, К; (например $T_1 = 293\text{К}$); T_2 — текущая (более высокая) температура масла, К (при которой вычислим плотность ρ_1); $T_0 = 1\text{К}$ — нулевое значение температуры масла (чтобы сократить обозначение размерности температуры в формуле (5)); $(\rho_2 - \rho_1)$ — величина противлежащего катета угла α ; $(T_2 - T_1)$ — величина прилежащего катета угла α .

Для определения $\text{tg } \alpha_1$ следует брать исходные данные по температуре и плотности масла марки МС-20 при $p_1 = 0$ из табл. 5, а также из табл. 3 (первый столбец при $p_1 = 0$).

Таблица 5

Плотность масла марки МС-20 в зависимости от температуры при нормальном давлении, определяемая по формуле (3)

Температура масла, К	Плотность масла, кг/м ³
293	892,3
303	886,6
313	881,0
323	875,3
333	869,6
343	864,0
353	858,3
363	852,7
373	847,0
383	841,3
393	835,7
403	830,0
413	824,4
423	818,7

Далее находим значения $\text{tg } \alpha$ для всех наклонных рабочих линий (см. рис. 1 и табл. 3) для всех избыточных давлений, например:

$$\text{tg } \alpha_1 = (892,3 - 818,7) / (423 - 293) = 0,566 \text{ для } p_1 = 0;$$

$$\text{tg } \alpha_2 = (892,6 - 819,2) / (423 - 293) = 0,564 \text{ для } p_2 = 0,5 \text{ МПа и т. д.}$$

Результаты всех расчетов сведены в табл. 6.

Таблица 6

Тангенс угла α при различных (избыточных) давлениях

p_i , МПа	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$\text{tg } \alpha_i$	0,566	0,564	0,562	0,560	0,558	0,556	0,554

График зависимости $\text{tg } \alpha$ от давления (рис. 3), построенный по данным табл. 6, позволяет в диапазоне рабочих температур быстро определять значения $\text{tg } \alpha$ при любых рабочих давлениях, включая промежуточные значения.

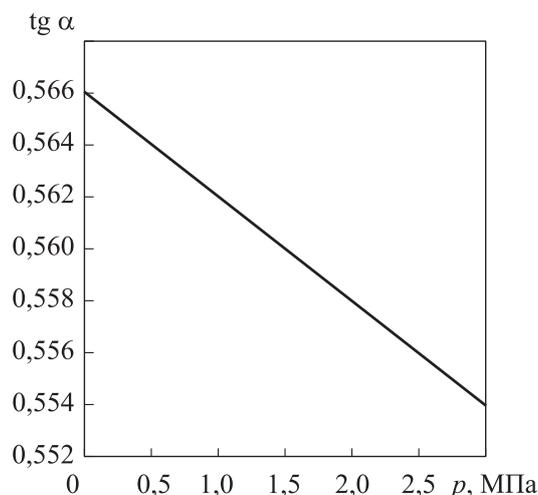


Рис. 3. Зависимость $\text{tg } \alpha_i$ от давления p_i для моторного авиационного масла марки МС-20 в диапазоне рабочих температур

После нахождения конкретного числа величины тангенса угла (α), например, для наклонной рабочей линии I (при $p_1 = 0$) (см. рис. 1), необходимо из формулы (5) выделить величину ρ_1 — плотность масла при более высокой температуре (T_2) по отношению к первоначальной $T_1 = 293\text{К}$, которую далее надо будет аналитически определять по формуле

$$\rho_1 = \rho_2 - \rho_0 \left[\text{tg } \alpha \left(\frac{T_2 - T_1}{T_0} \right) \right]. \quad (6)$$

Теперь следует рассчитать ρ_1 по формуле (6) с использованием данных табл. 3, выбрав значения ρ_2 из табл. 3 для соответствующих давлений при $T_1 = 293\text{К}$. Например:

для давления $p_1 = 0$

$$\rho_1 = 892,3 - 0,566 \cdot (303 - 293) = 886,64 \text{ кг/м}^3 \text{ при } T_2 = 303\text{К};$$

$$\rho_1 = 892,3 - 0,566 \cdot (313 - 293) = 880,98 \text{ кг/м}^3 \text{ при } T_2 = 313\text{К};$$

для давления $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$

$$\rho_1 = 892,6 - 0,564 \cdot (303 - 293) = 886,98 \text{ кг/м}^3 \text{ при } T_2 = 303\text{К};$$

$$\rho_1 = 892,6 - 0,564 \cdot (313 - 293) = 881,32 \text{ кг/м}^3 \text{ при } T_2 = 313\text{К} \text{ и т. д.}$$

Результаты расчетов плотности по формуле (6) при разных значениях давления и температуры сведены в табл. 7.

Плотность масла марки МС-20, рассчитанная по формуле (6)

Температура, К	Плотность, кг/м ³ , при избыточном давлении p_2 , МПа и при $\text{tg } \alpha_i$						
	$p_2 = 0$, $\text{tg } \alpha_1 =$ $= 0,566$	$p_2 = 0,5$, $\text{tg } \alpha_2 =$ $= 0,564$	$p_2 = 1,0$, $\text{tg } \alpha_3 =$ $= 0,562$	$p_2 = 1,5$, $\text{tg } \alpha_4 =$ $= 0,560$	$p_2 = 2,0$, $\text{tg } \alpha_5 =$ $= 0,558$	$p_2 = 2,5$, $\text{tg } \alpha_6 =$ $= 0,556$	$p_2 = 3,0$, $\text{tg } \alpha_7 =$ $= 0,554$
293	–	–	–	–	–	–	–
303	886,64	886,98	887,28	887,6	887,92	888,24	888,56
313	880,98	881,32	881,66	882,0	882,34	882,68	883,02
323	875,32	875,68	876,04	876,4	876,76	877,12	877,48
333	869,66	870,04	870,42	870,8	871,18	871,56	871,94
343	864,0	864,4	864,8	865,2	865,6	866,0	866,4
353	858,34	858,76	859,18	859,6	860,02	860,44	860,86
363	852,68	853,12	853,56	854,0	854,44	854,88	855,32
373	847,02	847,48	847,94	848,4	848,86	849,32	849,78
383	841,36	841,84	842,32	842,8	843,28	843,76	844,24
393	835,7	836,2	836,7	837,2	837,7	838,2	838,7
403	830,04	830,56	831,08	831,6	832,12	832,64	833,16
413	824,38	824,92	825,48	826,0	826,54	827,08	827,62
423	818,72	819,28	819,84	820,4	820,96	821,52	822,08

Приведем сравнение значений плотности масла марки МС-20, полученных при расчетах по разным формулам и представленных в табл. 3 и 7. Например:

для давления $p_1 = 0$

при $T_2 = 303\text{К}$ после сравнения с данными из табл. 3, 7 можно считать погрешность определения плотности

$$\Delta = 886,64 - 886,60 = 0,04 \text{ (кг/м}^3\text{)};$$

при $T_2 = 313\text{К}$ — $\Delta = 881,0 - 880,98 = 0,02 \text{ (кг/м}^3\text{)}$ и т. д.;

для давления $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$

при $T_2 = 303\text{К}$ — $\Delta = 886,98 - 886,9 = 0,8 \text{ (кг/м}^3\text{)}$;

при $T_2 = 313\text{К}$ — $\Delta = 881,32 - 881,3 = 0,02 \text{ (кг/м}^3\text{)}$ и т. д.

Для сравнения результаты расчета погрешности определения плотности Δ масла марки МС-20 показаны в табл. 8.

Анализ данных табл. 8 позволяет сделать вывод, что расчет по формуле (6) дает хороший результат: величина Δ ни разу не превысила 1 кг/м^3 , минимальное значение Δ равно 0, максимальное — $0,26 \text{ кг/м}^3$.

Погрешность определения плотности Δ , кг/м³, масла марки МС-20 в табл. 3 и 7

Температура, К	Δ , кг/м ³ , при избыточном давлении, МПа						
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
293	–	–	–	–	–	–	–
303	0,04	0,08	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
313	0,02	0,02	0,06	0,00	0,04	0,08	0,12
323	0,02	0,08	0,40	0,10	0,06	0,12	0,18
333	0,06	0,04	0,12	0,10	0,18	0,16	0,24
343	0,00	0,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20
353	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,26
363	0,02	0,01	0,06	0,10	0,14	0,08	0,12
373	0,20	0,08	0,04	0,10	0,16	0,12	0,18
383	0,06	0,04	0,12	0,10	0,18	0,16	0,24
393	0,00	0,00	0,1	0,10	0,1	0,10	0,20
403	0,40	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
413	0,02	0,02	0,08	0,00	0,04	0,08	0,12
423	0,02	0,06	0,04	0,10	0,06	0,12	0,08

Уникальность формулы (6) заключается в том, что для нахождения по ней искомой плотности масла ρ_1 при любой рабочей температуре T_2 и каком-то конкретном давлении нужно знать всего две величины: тангенс угла наклона $\operatorname{tg} \alpha$ при конкретном давлении, т. е. выбрать его, например, по табл. 7 или по графику, например, на рис. 3, а также значение ρ_2 при начальных условиях, т. е. при температуре $T_1 = 293\text{K}$ и таком же (конкретном) давлении выбрать, например, по табл. 3.

На основе этой новой методики определения плотности моторного авиационного масла марки МС-20 при различных температурах и давлениях можно предложить общий алгоритм нахождения плотности любого нефтяного масла, в том числе и моторного авиационного:

1) найти общие технические, физические и теплофизические свойства рассматриваемого нефтяного масла при различных температурах и нормальном давлении (при нулевом избыточном давлении), используя общедоступную информацию, сведения из справочников, ГОСТов, а также «Рекомендации по метрологии Р.50.2.076–2010» [4];

2) создать сравнительную таблицу значений плотности данного масла, приведенных авторами различных источников, а также значений, полученных в результате расчета по рекомендациям [4], при нормальном давлении и в техническом (и физическом) интервале температур, провести анализ собранных данных, взяв за основу для дальнейшей работы результаты расчета по рекомендациям [4];

3) следуя рекомендациям [4], провести расчеты по формуле (3) и создать таблицу значений плотности рассматриваемого масла при тех же различных температурах и более высоких давлениях, отличных от нулевого, например, при 0,5 МПа; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 МПа и более;

4) с помощью полученных табличных значений плотности масла построить графики зависимости плотности масла от температуры при различных давлениях;

5) используя полученные табличные данные и графики, найти тангенсы углов наклонных рабочих линий для каждого давления и свести результаты в таблицу, на основе которой построить график зависимости тангенса угла наклона рабочей линии от давления. Следует уточнить, что значения тангенсов углов наклонных рабочих линий можно определить и без построения графиков, например по формуле (5);

6) использовать возможность быстро найти по формуле (6) искомую плотность (ρ_1) рассматриваемого масла при конкретном давлении и разных рабочих температурах.

Заключение. Проведен обзор и анализ значений плотности моторного авиационного масла марки МС-20 в широком диапазоне рабочих температур и давлений, представленных в работах различных авторов, что позволило сделать следующие выводы:

– при нормальном давлении не предложено одинаковых и полных данных, лишь несколько авторов представили сведения в полном диапазоне рабочих температур;

– вообще отсутствуют какие-либо данные при различных давлениях;

– наиболее правильные и достоверные значения плотности этого масла при нормальном и повышенных давлениях в широком диапазоне рабочих температур можно определить по методикам и по формулам, которые представлены в документе «Рекомендации по метрологии Р.50.2.076–2010» [4].

На основе материалов [4] авторами данной статьи создана новая методика и выведены формулы для быстрого и эффективного нахождения и расчета плотности моторного авиационного масла марки МС-20 в широком диапазоне рабочих температур и давлений. На их основе был разработан общий алгоритм определения плотности любого нефтяного масла, включая любое моторное авиационное масло, при различных температурах и давлениях.

Представленный материал позволяет расширить существующие способы и методы определения плотности моторного авиационного масла марки МС-20 и других нефтяных масел, в том числе и моторных авиационных, при различных температурах и давлениях.

Применение данного нового способа и метода дает возможность:

– сократить время и уменьшить трудоемкость определения плотности различных нефтяных масел, в том числе применяемых в двигателях и ЭУ ЛА и в наземных ТС, в широком диапазоне рабочих давлений и температур;

– проводить более точные расчеты термодинамических процессов в системах смазки и охлаждения в двигателях и ЭУ ЛА и в наземных ТС;

– проектировать и создавать новую отечественную технику наземного, воздушного, аэрокосмического, гиперзвукового и космического базирования двойного назначения с повышенными характеристиками по ресурсу, надежности, эффективности, выживаемости, безопасности и экономичности.

Определение плотности моторного авиационного масла при разных значениях давления и температуры по новой методике позволило авторам статьи [20–24]:

– уточнить методику расчета негативного процесса осадкообразования в системах смазки и охлаждения в двигателях и ЭУ ЛА и наземных ТС;

– создать новую методику расчета влияния электростатических полей на предотвращение осадкообразования и интенсификацию теплоотдачи к моторным авиационным маслам в условиях их естественной и вынужденной конвекции этих масел;

– разработать новые конструктивные схемы масляных (охлаждаемых и неохлаждаемых) форсунок, каналов, фильтров повышенных характеристик как без использования, так и с использованием электростатических полей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Варгафтик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. Изд. 3-е, стереотип., испр. Москва, Изд-во «ООО «Старс»», 2006, 720 с.
- [2] Чередниченко Г.И., Фройштетер Г.Б., Ступак П.М. *Физико-химические и теплофизические свойства смазочных материалов*. Ленинград, Химия, 1986, 224 с.
- [3] ГОСТ 21743–2021. *Масла авиационные. Технические условия*. Москва, Изд-во «Российский институт стандартизации», 2022, 8 с.
- [4] Рекомендации по метрологии Р.50.2.076–2010. *Государственная система обеспечения единства измерений «Плотность нефти и нефтепродуктов. Методы расчета. Программа и таблицы приведения»*. Москва, Изд-во «Стандартинформ», 2011, 141 с.
- [5] Папок К.К. *Смазочные масла*. Москва, Военное изд-во Мин-ва обороны СССР, 1953, 168 с.
- [6] Трянов А.Е. *Конструкция масляных систем авиационных двигателей*. Самара, Изд-во Самар. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. С.П. Королёва, 2007, 81 с.

- [7] Рябов В.Г., Кудинов А.В., Федотов К.В. *Сборник номограмм для проведения технологических расчетов процессов нефтепереработки. Часть 1. Физико-химические свойства нефти и нефтепродуктов*. Пермь, Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2002, 98 с.
- [8] Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 4*. Москва, Машиностроение, 2008, 190 с.
- [9] Чигрин В.С., Белова С.Е. *Системы смазки ГТД*. Рыбинск, РГАТА им. П.А. Соловьёва, 2005, 20 с.
- [10] Бабкин В.И., Алексахин А.А., Яновский Л.С., Дунаев С.В., Хурумова А.Ф. Отечественные смазочные масла для авиационных газотурбинных двигателей: проблемы и перспективы. *Двигатель*, 2012, № 5 (83), с. 8–11.
- [11] Яновский Л.С., Дубовкин Н.Ф., Галимов Ф.М. и др. *Горюче-смазочные материалы для авиационных двигателей*. Казань, Казанский гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева, 2002, 400 с.
- [12] Яновский Л.С., Галимов Ф.М., Аляев В.А. *Отечественные и зарубежные горюче-смазочные материалы*. Казань, Изд-во Казанск. ун-та, 2004, 92 с.
- [13] Яновский Л.С., Дубовкин Н.Ф., Галимов Ф.М. и др. *Инженерные основы авиационной химмотологии*. Казань, Изд-во Казанск. ун-та, 2005, 714 с.
- [14] Яновский Л.С., Харин А.А. *Химмотологическое обеспечение надежности авиационных газотурбинных двигателей: монография*. Москва, ИНФРА-М, 2015, 264 с.
- [15] Балякин В.Б. Проблемы и перспективы использования газо- и гидродинамической смазки в уплотнениях опор роторов авиационных двигателей. *Изв. вузов. Авиационная техника*, 2017, № 2, с. 129–132.
- [16] Григорьев М.А., Бунаков Б.М., Долецкий В.А. *Качество моторного масла и надежность двигателей*. Москва, Изд-во стандартов, 1981, 232 с.
- [17] Боев А.А., Петрухин А.Г., Шкловец А.О. О перспективном подводе масла к подшипниковому узлу ГТД. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2013, т. 15, № 6 (4), с. 1022–1026.
- [18] Фаворский О.Н., Курзинер Р.И. Развитие воздушно-реактивных двигателей для авиации высоких скоростей полета — синтез достижений различных отраслей науки и техники. *Авиационные двигатели. ЦИАМ им. П.И. Баранова*, 2022, № 3 (16), с. 7–14.
- [19] Чуркин В.А. *Смазочные материалы*. Екатеринбург, Изд-во УрГУ, 2015, 14 с.
- [20] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Львов М.В., Щиголов А.А., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Проблемы систем смазки авиационных двигателей. *Тепловые процессы в технике*, 2021, т. 13, № 8, с. 357–384.
- [21] Алтунин В.А., Львов М.В., Гинятуллин И.А., Каськов А.С., Платонов Е.Н., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Разработка топливно-масляных теплообменных аппаратов для двигателей воздушных и аэрокосмических летательных аппаратов. *Труды 55-х чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского (г. Калуга, 15–16 сентября 2020 г.)*. РАН, РАКЦ. Казань, Изд-во Казанского ун-та, 2021, с. 86–94.
- [22] Алтунин В.А., Львов М.В., Каськов А.С., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Проблемы осадкообразования в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Материалы докл. 56-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского: «Циолковский и прогресс науки и техники в 21 веке»*. РАН, РАКЦ. Калуга, Изд-во «Эйдос», 2021, ч. 1, с. 220–224.
- [23] Алтунин В.А., Львов М.В., Каськов А.С., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Проблемы осадкообразования в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Современные проблемы ракетной и космической техники: сб.*

научных статей (полных докладов) 56-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. (Калуга, 21–22 сентября 2021 г.). РАН, РАКЦ. Казань, Ред.-изд. центр «Школа», 2022, с. 99–113.

- [24] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Разработка и создание экспериментальной установки для исследования особенностей тепловых процессов в условиях вынужденной конвекции моторных авиационных масел. Тез. докл. 20-й Междунар. конф. «Авиация и космонавтика» (Москва, МАИ 22–26 ноября 2021 г.). Москва, Изд-во «Перо», 2021, с. 124–125.

Статья поступила в редакцию: 23.12.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголов А.А., Юсупов А.А., Яновская М.Л. Расчет плотности моторного авиационного масла марки МС-20 при различных температурах и давлениях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 2.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2252>

Алтунин Виталий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ; академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского (РАКЦ). Заслуженный изобретатель Республики Татарстан. e-mail: altspacevi@yahoo.com.

Львов Михаил Валерьевич — аспирант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ.

Щиголов Александр Александрович — докторант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ.

Юсупов Артур Альбертович — аспирант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ.

Яновская Мария Леонидовна — канд. техн. наук, младший научный сотрудник Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова.

Calculation of the density of motor aviation MS-20 brand oils at various temperature and pressure

© V.A. Altunin¹, M.V. Lvov¹, A.A. Schigolev¹,
A.A. Yusupov¹, M.L. Yanovskaya²

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI,
Kazan, 420111, Russia

² Baranov Central Institute of Aviation Motors, Moscow, 111116, Russia

The article shows that various problems appear in the aircraft lubrication systems. These problems are associated with the quality of aviation motor oils, difficult thermodynamic conditions in their operation, negative sedimentation process, design features and deficiencies of piston aviation internal combustion engines, air-breathing engines, various aviation and ground power plants, as well in their filtering and cooling systems. Design and creation of new equipment foresees using aviation motor oils of various brands and properties; therefore, scientists, designers, engineers and constructors always need to know not only the selected oil general properties, but also its thermophysical properties, including density, thermal conductivity, viscosity and thermal capacity. The paper considers the issue of the MS-20 aviation engine oil density at various temperatures and pressures. A number of authors (and information sources) provide comparative data on this oil; its density values at different temperatures and normal pressure are having differences. Methods for obtaining density values of the aviation motor oils, including the MS-20 brand oils, are presented in experimental studies; in using nomograms, graphs and tables; in calculations using various techniques. The method for calculating the MS-20 oil density with an increase in temperature and pressure set out in the State Standards is demonstrated. A new abbreviated and effective method for calculating the aviation motor oils density with alterations in temperature and pressure, including the MS-20 brand oil, was developed and is presented. Recommendations are provided on the correct account of temperature and pressure when using density of the MS-20 and other types of the aviation engine oil to create new domestic ground, air, hypersonic and aerospace equipment for single-use and reusable for various purposes with improved performance in terms of resource, reliability and efficiency.

Keywords: *aviation engine oil, thermophysical properties, temperature, pressure, density, calculation, aircraft engines and power plants*

REFERENCES

- [1] Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Reference book on thermophysical properties of gases and liquids]. 3rd ed., stereotyp., rev. Moscow, Stars Publ., JSC, 2006, 720 p.
- [2] Cherednichenko G.I., Froysheter G.B., Stupak P.M. *Fiziko-khimicheskie i teplofizicheskie svoystva smazochnykh materialov* [Physico-chemical and thermophysical properties of lubricants]. Leningrad, Khimiya Publ., 1986, 224 p.
- [3] *GOST 21743–2021. Masla Aviatsionnye. Tekhnicheskie usloviya* [Aviation oils. Technical specifications]. Moscow, Rossiyskiy Institut Standartizatsii Publ., 2022, 8 p.
- [4] *Rekomendatsii po metrologii: R.50.2.076–2010* [Recommendations on metrology: R.50.2.076–2010]. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy “Plotnost nefi i nefteproduktov. Metody rascheta. Programmy i tablitsy privedeniya* [State system for ensuring the uniformity of measurements “Density

- of oil and oil products. Calculation methods. Actuation program and tables”]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 141 p.
- [5] Papok K.K. *Smazochnye masla* [Lubricating oils]. Moscow, Ministry of Defence of the USSR Military Publ., 1953, 168 p.
- [6] Tryanov A.E. *Konstruktsiya maslyanykh sistem aviatsionnykh dvigateley* [Design of the oil systems of aviation engines]. Korolev Samara State Aerospace University Publ., 2007, 81 p.
- [7] Ryabov V.G., Kudinov A.V., Fedotov K.V. *Sbornik nomogramm dlya privedeniya tekhnologicheskikh raschetov protsessov neftepererabotki. Chast 1. Fiziko-khimicheskie svoystva nefi i nefteproduktov* [Collection of nomograms for technological calculations of the oil refining processes. Part 1. Physicochemical properties of oil and oil products]. Perm, Perm State Technical University Publ., 2002, 98 p.
- [8] Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratsky V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok* [Fundamentals of construction of aviation engines and energy plants]. Vol. 4. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 190 p.
- [9] Chigrin V.S., Belova S.E. *Sistemy smazki GTD* [GTE lubrication systems]. Rybinsk, Solovyev RSATA Publ., 2005, 20 p.
- [10] Babkin V.I., Aleksashin A.A., Yanovsky L.S., Dunaev S.V., Khurumova A.F. *Otechestvennye smazochnye masla dlya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley; problemy i perspektivy* [Domestic lubricants for aviation gas turbine engines: problems and prospects]. *Dvigatel — Engine*, 2012, no. 5 (83), pp. 8–11.
- [11] Yanovsky L.S., Dubovkin N.F., Galimov F.M., et al. *Goryuche-smazochnye materialy dlia aviatsionnykh dvigateley* [Fuel-lubricant materials for aircraft engines]. Kazan, Tupolev Kazan State Technical University Publ., 2002, 400 p.
- [12] Yanovsky L.S., Galimov F.M., Alyaev V.A. *Otechestvennye i zarubezhnye goryuche-smazochnye materialy* [Domestic and foreign fuel-lubricant materials]. Kazan, Kazan University Publ., 2004, 92 p.
- [13] Yanovsky L.S., Dubovkin N.F., Galimov F.M., et al. *Inzhenernye osnovy aviatsionnoy khimologii* [Engineering foundations of aviation chemotology]. Kazan, Kazan University Publ., 2005, 714 p.
- [14] Yanovsky L.S., Kharin A.A. *Khimnologicheskoye obespechenie nadezhnosti aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley: monografiya* [Chemotological support of reliability of the aviation gas turbine engines: monograph]. Moscow, INFRA-M Publ., 2015, 264 p.
- [15] Balyakin V.B. *Problemy i perspektivy ispolzovaniya gazo- i gidrodinamicheskoy smazki v uplotneniyakh opor rotorov aviatsionnykh dvigateley* [Problems and prospects for using gas – and hydrodynamic lubrication in the seals of the supports of the aviation engine rotors]. *Izv. vuz. Aviatsionnaya Tekhnika*, 2017, no. 2, pp. 129–132.
- [16] Grigoryev M.A., Bunakov B.M., Doletsky V.A. *Kachestvo motornogo masla i nadezhnost dvigateley* [Quality of motor oil and reliability of engines]. Moscow, Standards Publ., 1981, 232 p.
- [17] Boev A.A., Petrukhin A.G., Shklovets A.O. *O perspektivnom podvode masla k podshipnikovomu uzlu GTD* [About promising method supply oil to bearing of gas turbine engine]. *Izvestia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, vol. 15, no. 6 (4), pp. 1022–1026.
- [18] Favorsky O.N., Kurziner R.I. *Razvitie vozdushno-reaktivnykh dvigateley dlya aviatsii vysokikh skorostey poleta – sintez dostizheniya razlichnykh otrasley nauki i tekhniki* [Development of air-jet engines for aviation of high flight

- speeds: synthesis of the achievements in various branches of science and technology]. *Aviatsionnye dvigateli. TSIAM im. P.I. Baranova — Aviation engines. Baranov CIAM*, 2022, no. 3 (16), pp. 7–14.
- [19] Churkin V.A. *Smazochnye materialy* [Lubricant materials]. Yekaterinburg, UrGU Publ., 2015, 14 p.
- [20] Altunin V.A., Altunin K.V., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Aliyev I.N., Yanovskaya M.L. Problemy sistem smazki aviatsionnykh dvigateley [Problems of lubrication systems of the aviation engines]. *Teplovye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2021, vol. 13, no. 8, pp. 357–384.
- [21] Altunin V.A., Lvov M.V., Ginyatullin I.A., Kaskov A.S., Platonov E.N., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Razrabotka toplivno-maslyanykh teploobmennyykh apparatov dlya dvigateley vozdushnykh i aerokosmicheskikh letatelnykh apparatov [Development of fuel–oil heat exchangers for engines of aerial and aerospace vehicles]. In: *Trudy 55-kh chteniy, posvyaschennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo. (Kaluga, 15–16 sentyabrya 2020 g.) RAN. RAKTs* [Proceedings of the 55th Readings devoted to the development of scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky. (Kaluga, September 15–16, 2020). RAS. RACTs]. Kazan, Kazan University Publ., 2021, pp. 86–94.
- [22] Altunin V.A., Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Problemy osadkoobrazovaniya v sistemakh smazki dvigateley letatelnykh apparatov [Recording problems in aircraft engines lubricating systems]. In: *Materialy dokl. 56-kh Nauchnykh chteniy, posvyaschennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo: “Tsiolkovskiy i progress nauki i tekhniki v 21 veke”*. RAN. RAKTs [Materials of the LVIIth Scientific Readings devoted to the development of K.E. Tsiolkovsky's scientific heritage and ideas “K.E. Tsiolkovsky and the progress of science and technology in the XXI century”. RAS. RACTs]. Kaluga, Eidos Publ., 2021, part 1, pp. 220–224.
- [23] Altunin V.A., Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Problemy osadkoobrazovaniya v sistemakh smazki dvigateley letatelnykh apparatov [Recording problems in aircraft engines lubricating systems]. In: *Sovremennyye problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki: sb. nauchnykh statey (polnykh dokladov) 56-kh nauchnykh chteniy pamyati K.E. Tsiolkovskogo. (Kaluga, 21–22 sentyabrya 2021 g.) RAN. RAKTs* [Modern problems of missile and space technology: collection of scientific articles (full reports) of the 56th scientific readings devoted to the memory of K.E. Tsiolkovsky (Kaluga, September 21–22, 2021). RAS. RACTs]. Kazan, Editorial and Publishing Center “Shkola” Publ., 2022, pp. 99–113.
- [24] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Razrabotka i sozdanie eksperimentalnoy ustanovki dlya issledovaniya osobennostey teplovykh protsessov v usloviyakh vyzhdennoy konveksii motornykh aviatsionnykh masel [Development and creation of experimental installation for the study of the thermal processes features in conditions of forced convection of the motor aviation oils]. In: *Tez. dokl. 20-y Mezhdunar. konf. “Aviatsiya i kosmonavtika” (Moskva, MAI 22–26 noyabrya 2021 g.)* [Thesis of reports of the 20th Int. Conf. “Aviation and Cosmonautics”. (Moscow, MAI, November 22–26, 2021)]. Moscow, Pero Publ., 2021, pp. 124–125.

Altunin V.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Thermal Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI; Academician of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky (RACTs). Honored Inventor of the Republic of Tatarstan.
e-mail: altspacevi@yahoo.com

Lvov M.V., PG, Department of Thermal Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI.

Shchigolev A.A., Doctoral Candidate, Department of Thermal Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI.

Yusupov A.A., PG, Department of Thermal Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI.

Yanovskaya M.L., Cand. Sc. (Eng.), Junior Researcher, Baranov Central Institute of Aviation Motors.