

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ
НА ОСНОВЕ ФОСФАТНОГО ЭФИРА РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ****Е. Е. Майоров^{1*}, Г. А. Костин², В. В. Курлов¹, Н. Е. Баранов²**

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

* majorov_ee@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования современных авиационных гидравлических жидкостей на основе фосфатного эфира лабораторным рефрактометром ИРФ „Компакт“. Получены экспериментальные данные по показателю преломления в зависимости от концентрации и температуры растворов исследуемых авиационных гидравлических жидкостей, предназначенные для работы технических служб аэропорта, где необходима высокоточная и достоверная информация о составе и расходе вещества. Приведены оптическая схема и технические параметры измерительного прибора.

Ключевые слова: рефрактометр, авиационная гидравлическая жидкость, концентрация, температурный коэффициент, полином, показатель преломления, аппроксимация

Ссылка для цитирования: Майоров Е. Е., Костин Г. А., Курлов В. В., Баранов Н. Е. Исследование современных авиационных гидравлических жидкостей на основе фосфатного эфира рефрактометрическим методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 609–614. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-609-614.

**STUDY OF MODERN AVIATION HYDRAULIC FLUIDS BASED ON PHOSPHATE ESTER
BY REFRACTOMETRIC METHOD****E. E. Maiorov^{1*}, G. A. Kostin², V. V. Kurlov¹, N. E. Baranov²**

¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

* majorov_ee@mail.ru

² St. Petersburg State University of Civil Aviation, St. Petersburg, Russia

Abstract. Results of a study of modern aviation hydraulic fluids based on phosphate ester carried out with the use of laboratory refractometer IRF "Compact", are presented. Experimental data on the refractive index depending on the concentration and temperature of the solutions of the studied aviation hydraulic fluids are obtained. Highly accurate and reliable information on the composition and consumption of the substance is necessary for the work of airport technical services. The optical diagram and technical parameters of the measuring device are given.

Keywords: refractometer, aviation hydraulic fluid, concentration, temperature coefficient, polynomial, refractive index, approximation

For citation: Maiorov E. E., Kostin G. A., Kurlov V. V., Baranov N. E. Study of modern aviation hydraulic fluids based on phosphate ester by refractometric method. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 7. P. 609–614 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-609-614.

Введение. В настоящее время существует широкий класс методов и технических средств измерений форм объектов и состава различных сред [1]. Эти методы и технические средства подразделяются на методы разрушающего и неразрушающего контроля [2]. При механическом и химическом взаимодействии происходит изменение формы или состава вещества, которые контролируются соответствующими приборами и комплексами [3]. При использовании методов неразрушающего контроля, к которым относятся оптические и оптико-электронные методы и средства, отсутствуют механические контакты с исследуемыми объектами, а также не изменяется состав газообразной или жидкофазной среды [4].

На сегодняшний день огромное внимание уделяется диагностике и контролю веществ разного агрегатного состояния с использованием методов оптических измерений и соответствующих приборов [5]. Пример таких приборов — лабораторные рефрактометры, обеспечивающие получение достоверных и высокоточных результатов измерений для научных исследований [6].

Для основообразующих ингредиентов авиационных гидравлических жидкостей (АГЖ) класса Туре V марок Скайдрол ПЕ5 и Скайдрол 5, таких как трибутилфосфат и триизобутилфосфат, также необходим соответствующий контроль [7]. Эти АГЖ широко применяются в современных гидроагрегатах и гидросистемах летательных аппаратов для достижения максимальной производительности [8]. Для того чтобы АГЖ сохраняли заявленные свойства (физико-химические), их контроль осуществляется с использованием рефрактометрических технологий. Как известно из физической оптики, рефрактометрические технологии основаны на методе полного внутреннего отражения [9]. Рефрактометрия востребована в производстве, где используется непосредственно в исследуемом потоке и обеспечивает в непрерывном режиме измерения состава вещества и его общий расход. Обзор областей применения рефрактометров показал, что и в лабораторных условиях также стали чаще использоваться данные приборы [10]. Применительно к рассматриваемому вопросу, при исследовании образцов проб использование лабораторных рефрактометров позволяет обеспечить оптимизацию предполетной подготовки (диагностика и контроль АГЖ).

Рефрактометрические технологии, как высокоточный метод оптических измерений, должны обеспечивать получение достоверных данных по оптическим свойствам контролируемых сред, таких как концентрационная и температурная зависимости показателя преломления и средняя дисперсия исследуемых жидкостей [11]. Информация об оптических параметрах приводится научных источниках по авиационным смывкам, противообледенительным авиационным жидкостям и АГЖ [12, 13].

Несомненный интерес представляет исследование растворов АГЖ на основе фосфатного эфира в лабораторных условиях с помощью рефрактометрического измерительного прибора ИРФ „Компакт“ (Россия). Именно этому и посвящена настоящая статья.

Постановка задачи. Используя рефрактометрический метод измерения, найти концентрационную зависимость показателя преломления по мере увеличения концентрации состава авиационной гидравлической жидкости в водном растворе. Выбрав три образца с концентрациями 25, 50 и 75 %, получить графические зависимости показателя преломления от температуры. Вывести результаты для модели раствора исследуемой жидкости в воде как многоингредиентной смеси.

Метод и объекты исследования. Исследованию подлежали растворы жидкофазных многоингредиентных смесей: АГЖ класса Туре V Скайдрол ПЕ5 и Скайдрол 5 на основе фосфатных эфиров. АГЖ относятся к слегка окрашенным жидким средам.

Скайдрол ПЕ5 — жидкость, имеющая специальный состав, что позволяет сохранять необходимую производительность в течение длительного срока [14–16]; эта жидкость зарекомендовала себя в условиях повышенной влажности и высоких температур, к преимуществам относятся также минимальные расходы на техническое обслуживание и объем утилизируемых потерь за счет увеличенного срока службы.

Преимущества Скайдрол 5 — возможность существенной экономии топлива; высокая термическая стабильность; устойчивость к эрозии при высоких температурах; низкая агрессивность к лакокрасочным покрытиям; повышенная огнестойкость по сравнению с жидкостями класса типа IV [14–16].

Лабораторный рефрактометр ИРФ „Компакт“ измеряет показатель преломления при различных концентрациях и температурах исследуемого вещества. Внешний вид прибора показан на рис. 1, а, оптическая схема представлена на рис. 1, б, где 1, 4, 11, 13 — отражающие поверхности, 2 — измерительная призма, 3 — стекло, 5 — осветительная призма, 6 — компенсационное устройство, 7 — собирающая линза, 8 — маркировочная сетка, 9 — окуляр, 10, 15, 16 — поворотные призмы, 12 — объектив, 14 — светофильтр, 17 — шкала.

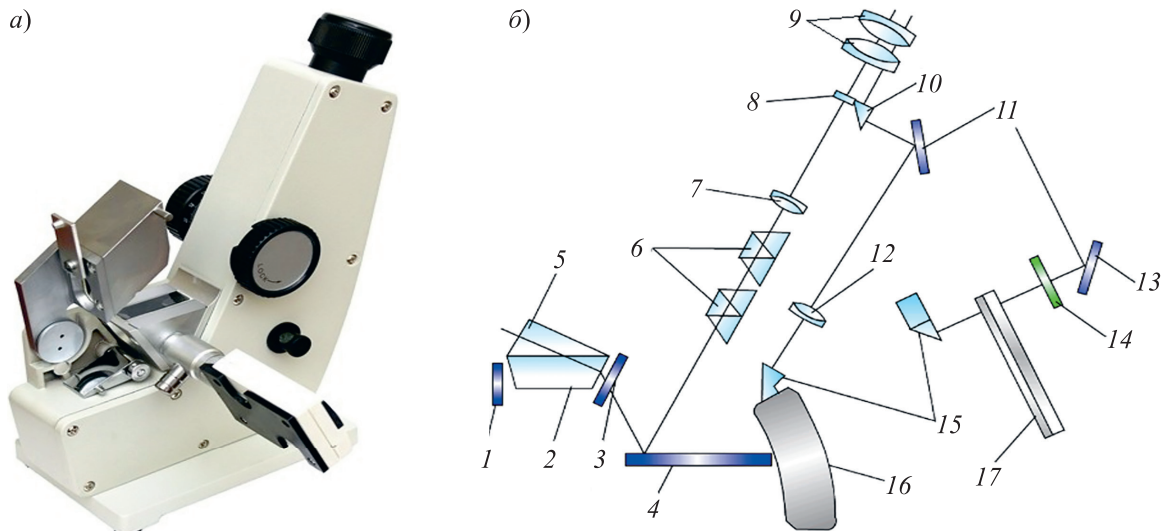


Рис. 1

Основной частью рефрактометра являются две призмы — измерительная 2 и осветительная 5. Между гипотенузными гранями призм вводится исследуемая доза раствора (несколько капель). Осветительная и измерительная призмы соединяются и исследуемая проба распределяется равномерно. Световое излучение направляется зеркалом 4 на компенсатор 6, линзу 7, сетку 8 и окуляр 9. Граница светотени совмещается с перекрестием, штрихи шкалы 17 и отсчетный штрих призмы 10 проецируются оптической системой в фокальную плоскость окуляра.

Технические параметры рефрактометра приведены ниже.

Показатель преломления n_D	1,3...1,7
Массовая доля сухих веществ (сахарозы) в растворе, %	0...5
Погрешность измерений:	
по показателю преломления n_D	$\pm 0,0001$
по средней дисперсии $n_F - n_C$	$\pm 0,00015$
Сходимость n_D , не более	0,00005
Габаритные размеры, мм, не более	200 × 80 × 240
Масса, кг, не более	2,6

Результаты исследования. Определялся показатель преломления АГЖ на лабораторном рефрактометре ИРФ „Компакт“. Источником излучения был светодиод с длиной волны $\lambda = 633$ нм. Согласно полученным данным показатель преломления растворов АГЖ имеет линейную зависимость от концентрации. Результаты измерения зависимости $n(k)$ для Скайдрол ПЕ5 и Скайдрол 5 по 14 пробам растворов, отличающимся концентрацией, приведены на рис. 2.

Результаты измерений были аппроксимированы полиномами третьей степени, имевшими следующий вид:

$$n(k) = 0,00000009 \cdot k^3 - 0,00002 \cdot k^2 + 0,0028 \cdot k + 1,3233,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9996$ для Скайдрол ПЕ5;

$$n(k) = -0,00000005 \cdot k^3 + 0,000007 \cdot k^2 + 0,0017 \cdot k + 1,3282,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9995$ для Скайдрол 5.

Для исследования влияния температуры на показатель преломления АГЖ необходимо было применить термометр, который входил в состав прибора. Измерения производились с шагом в 1° . Данные для трех образцов Скайдрол ПЕ5 и Скайдрол 5 с концентрациями 25, 50, 75 % и температурой исследуемых сред (20...45 °С) приведены на рис. 3: Скайдрол ПЕ5: 1 — $k = 25$ %, 3 — $k = 50$ %, 5 — $k = 75$ %; Скайдрол 5: 2 — $k = 25$ %, 4 — $k = 50$ %, 6 — $k = 75$ %.

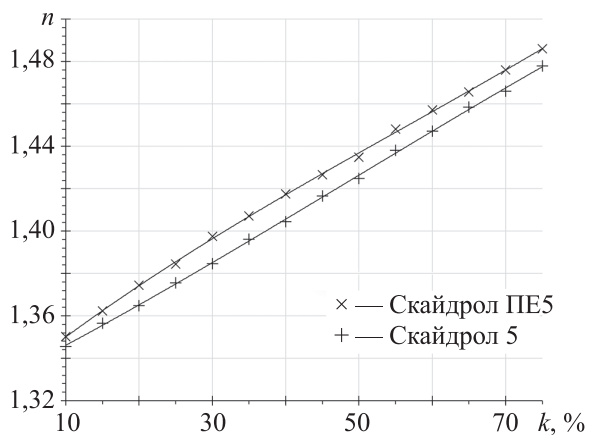


Рис. 2

На рис. 3 видно, что получены линейные зависимости показателя преломления от температуры, которые имеют следующий вид:

— для Скайдрол ПЕ5:

$$n(T) = 0,0003 \cdot T + 1,3906,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9906$ при $k = 25 \%$;

$$n(T) = -0,0004 \cdot T + 1,4426,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9964$ при $k = 50 \%$;

$$n(T) = -0,0006 \cdot T + 1,4974,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9982$ при $k = 75 \%$;

— для Скайдрол 5:

$$n(T) = -0,0002 \cdot T + 1,3804,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$ при $k = 25 \%$;

$$n(T) = -0,0003 \cdot T + 1,4321,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9948$ при $k = 50 \%$;

$$n(T) = -0,0004 \cdot T + 1,4871,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9969$ при $k = 75 \%$.

Согласно уравнениям температурный коэффициент показателя преломления составляет:

— для АГЖ Скайдрол ПЕ5

$$dn/dT = 0,0003 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 25 \%, \quad dn/dT = -0,0004 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 50 \%,$$

$$dn/dT = -0,0006 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 75 \%;$$

— для АГЖ Скайдрол 5

$$dn/dT = -0,0002 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 25 \%, \quad dn/dT = -0,0003 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 50 \%,$$

$$dn/dT = -0,0004 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 75 \%.$$

Сходимость эксперимента с расчетными данными не хуже $\Delta n \leq 0,004$.

Вывод. Проведенные исследования авиационных гидравлических жидкостей последнего поколения рефрактометрическим методом показали, что по мере увеличения показателя преломления наблюдается увеличение концентрации в растворе; при уменьшении показателя преломления зафиксировано увеличение температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишловский А. А. Прикладная физическая оптика. М.: Физматгиз, 1961. 822 с.
2. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1983. 352 с.
3. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 1999. 480 с.
4. Курлов В. В., Громов О. В., Таюрская И. С., Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б. Применение разработанного рефрактометрического датчика в пищевом производстве // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 2. С. 1–12.
5. Громов О. В., Майоров Е. Е., Таюрская И. С., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Удахина С. В. Экспериментальное исследование разработанного автоматизированного рефрактометра для контроля химически агрессивных сред // Научное обозрение. Технические науки. 2021. № 3. С. 21–26.
6. Майоров Е. Е., Курлов В. В., Громов О. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Применение рефрактометра для контроля напитков торговой марки „Lipton“ // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 6. С. 170–175.
7. Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Арефьев В. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В. Использование рефрактометрии для обеспечения предполетной подготовки воздушных судов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 10. С. 1–7.
8. Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В. Оптико-электронный контроль противообледенительных жидкостей для обработки воздушных судов // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 10. С. 170–175.
9. Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Арефьев В. В., Хохлова М. В., Удахина С. В. Исследование противообледенительной жидкости оптоэлектронным рефрактометром // Научное приборостроение. 2021. Т. 31, № 4. С. 88–101.
10. Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Громов О. В., Дагаев А. В., Курлов В. В., Майоров Е. Е., Таюрская И. С. Рефрактометрические средства контроля водных растворов тетрахлорэтилена // Научное приборостроение. 2022. Т. 32, № 2. С. 75–83.
11. Громов О. В., Гулиев Р. Б., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Применение метода полного внутреннего отражения для исследования жидкофазных сред на основе ботулотоксина // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 343–349.
12. Майоров Е. Е. Призмная рефрактометрия измерения оптических характеристик каустизационного щелока // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Третья Всерос. науч. конф.: Сб. докл. СПб: ГУАП, 2022. С. 59–61.
13. Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Пушкина В. П., Цыганкова Г. А. Рефрактометрический контроль состава сухого остатка лактиции в реальном производстве // Приборы. 2023. № 9. С. 10–14.
14. Майоров Е. Е., Курлов В. В., Бородинский Ю. М., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Рефрактометрический контроль веществ жидкого агрегатного состояния в пищевой промышленности // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 8. С. 269–274.
15. Арефьев А. В., Афанасьева О. В., Дагаев А. В., Курлов В. В., Майоров Е. Е., Таюрская И. С. Рефрактометрические методы и средства контроля этанола, пропанола и их водных растворов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 7. С. 594–601.
16. Skydrol. Специальный состав для соответствия постоянно изменяющимся требованиям авиационной промышленности [Электронный ресурс]: https://www.eastman.com/Literature_Center/A/AFRUS009.pdf, 25.11.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; доцент; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Геннадий Александрович Костин** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации; кафедра прикладной математики и информатики; проектор по науке и цифровизации, E-mail: g_kostin@mail.ru
- Виктор Валентинович Курлов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; кафедра инноватики и интегрированных систем качества; доцент; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Николай Евгеньевич Баранов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, кафедра аэродинамики и динамики полёта, доцент, заведующий кафедрой; E-mail: nbaranov@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.11.2023; одобрена после рецензирования 14.12.2023; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. Shishlovsky A.A. *Prikladnaya fizicheskaya optika* (Applied Physical Optics), Moscow, 1970, 822 p. (in Russ.)
2. Ioffe B.V. *Refraktometricheskiye metody analiza v khimii* (Refractometric Methods of Analysis in Chemistry), Leningrad, 1983, 351 p. (in Russ.)
3. Yakushenkov Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov* (Theory and Calculation of Optical-Electronic Devices), Moscow, 1999, 480 p. (in Russ.)
4. Kurlov V.V., Gromov O.V., Tayurskaya I.S., Maierov E.E., Arefyev A.V., Guliyev R.B. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 2, pp. 1–12. (in Russ.)
5. Gromov V.O., Maierov E.E., Tayurskaya I.S., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Udakhina S.V. *Scientific Review. Technical Science*, 2021, no. 3, pp. 21–26. (in Russ.)
6. Maierov E.E., Kurlov V.V., Gromov O.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 6, pp. 170–175, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175. (in Russ.)
7. Mikhalevsky Yu.Yu., Kostin G.A., Maierov E.E., Arefyev A.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 10, pp. 1–7, DOI: 10.25791/pribor.10.2021.1294. (in Russ.)
8. Mikhalevsky Yu.Yu., Kostin G.A., Maierov E.E., Kurlov V.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 10, pp. 134–138, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175. (in Russ.)
9. Mikhalevsky Y.Y., Kostin G.A., Maierov E.E., Arefyev A.V., Khokhlova M.V., Udachina S.V. *Nauchnoe Priborostroyeniye* (Scientific Instrumentation), 2021, no. 4(31), pp. 88–101. (in Russ.)
10. Arefyev A.V., Guliyev R.B., Gromov O.V., Dagaev A.V., Kurlov V.V., Maierov E.E., Tayurskaya I.S. *Nauchnoe Priborostroyeniye* (Scientific Instrumentation), 2022, no. 2(32), pp. 75–83. (in Russ.)
11. Gromov O.V., Guliyev R.B., Chernyak T.A., Maierov E.E., Dagaev A.V., Tayurskaya I.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 5(65), pp. 343–349, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-343-349. (in Russ.)
12. Maierov E.E. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem* (Modeling and Situational Quality Control of Complex Systems), Collection of reports of the Third All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18–22, 2022, pp. 59–61, DOI: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3. (in Russ.)
13. Maierov E.E., Arefyev A.V., Guliyev R.B., Pushkina V.P., Tsygankova G.A. *Devices*, 2023, no. 9, pp. 10–14. (in Russ.)
14. Maierov E.E., Kurlov V.V., Borodyansky Yu.M., Dagaev A.V., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2023, no. 8, pp. 269–274.
15. Arefyev A.V., Afanaseva O.V., Dagaev A.V., Kurlov V.V., Maierov E.E., Tayurskaya I.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 7(66), pp. 594–601. (in Russ.)
16. https://www.eastman.com/Literature_Center/A/AFRUS009.pdf. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Evgeny E. Maierov	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: maierov_ee@mail.ru
Gennady A. Kostin		Dr. Sci., Associate Professor; St. Petersburg State University of Civil Aviation; Department of Applied Mathematics and Informatics; Vice-Rector for Science and Digitalization; E-mail: g_kostin@mail.ru
Viktor V. Kurlov		PhD., Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Integrated Quality Systems; E-mail: vitek543@rambler.ru
Nikolay E. Baranov		PhD., Associate Professor; St. Petersburg State University of Civil Aviation; Department of Aerodynamics and Flight Dynamics; Head of the Department; E-mail: nbaranov@yandex.ru

Received 27.11.2023; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 16.05.2024